

Eliminación de contaminantes emergentes y microorganismos mediante filtración, adsorción y UV, con planta piloto AZUD autosuficiente



Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua

Trabajo Fin de Máster

Autor:
Ginés Blaya Ortega

Tutor/es:
Nuria Boluda
Beatriz Masdemont



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se apoya en el proyecto estratégico Ris3mur REUSAGUA, financiado por la Consejería de Empresa, Industria y Portavocía (Gobierno de Murcia) en el marco del Programa Operativo FEDER Región de Murcia 2014-2020.

Para el desarrollo del mismo ha sido necesaria la ayuda de una serie de personas que paso a nombrar y agradecer:

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a la empresa AZUD por haberme dado la oportunidad de realizar una beca para realizar prácticas en su empresa y darme todas las herramientas para llevar a cabo la investigación, principalmente me gustaría agradecer a mis tutoras Beatriz Masdemont y Teresa Munuera, por todo su apoyo durante las prácticas y por integrarme en sus tan interesantes proyectos. Gracias a vuestra ayuda he podido aprender, seguir creciendo. Me habéis guiado en todo momento y sin vuestra ayuda no hubiese podido realizar este trabajo.

También agradecer a Nuria Boluda, por su ayuda incansable durante todo este período del Máster, su preocupación para que todo saliera bien y su colaboración en la consecución de este trabajo.

Me gustaría nombrar también a todos los demás profesores del Máster, que nos han transmitido sus mejores conocimientos y, pese a las circunstancias, han permitido un desarrollo muy satisfactorio del curso.

A mi familia, mis padres y hermanos, por estar siempre ahí, en todas las circunstancias. Sin ellos nada sería posible.

Por último, y no menos importante a mis amigos, por todos los momentos vividos y los que vendrán.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN.	3
2. OBJETIVOS.	10
3. MATERIALES Y MÉTODOS.	11
3.1. UBICACIÓN.	11
3.2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO.	12
3.3. CONTAMINANTES ESTUDIADOS.	13
3.4. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN	16
4. ETAPA DE FILTRACIÓN. FILTROS DE DISCOS.	19
4.1. IMPORTANCIA DE LA ETAPA DE PRETRATAMIENTO.	19
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA.	20
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE FILTRACIÓN POR DISCOS.	22
5. ETAPA DE ADSORCIÓN. LECHO DE CARBÓN ACTIVADO.	25
5.1. IMPORTANCIA DE LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.	25
5.2. DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA.	27
5.3. CARACTERÍSTICAS DEL LECHO DE CARBÓN ACTIVO.	30
5.4. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.	34
5.5. MECANISMOS DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO CONTAMINADO.	35
6. ETAPA DE DESINFECCIÓN. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.	39
6.1. IMPORTANCIA DE LA DESINFECCIÓN DE AGUAS REGENERADAS. ..	39
6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA.	41
6.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES UV INSTALADOS.	41
6.4. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LA DESINFECCIÓN.	43
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	45
7.1. ETAPA DE FILTRACIÓN DE DISCOS.	45
7.2. ETAPA DE ADSORCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.	46
7.2.1 ENSAYOS DE FORTIFICACIÓN.	46
7.2.2 ENSAYOS EN CONTINUO CON AGUA REAL DE LA EDAR.	52

7.3. ETAPA DE DESINFECCIÓN.	55
8. CONCLUSIONES.	58
BIBLIOGRAFÍA	60

RESUMEN

La escasez de agua es uno de los grandes retos que afronta la humanidad, es por esto por lo que la necesidad de encontrar nuevas fuentes de agua ha quedado patente a lo largo de los años, considerándose las fuentes no convencionales como una alternativa viable para aumentar el recurso.

En este sentido, la reutilización planificada del agua se está transformando en un componente integral en los proyectos de sanidad y suministro de agua en muchas regiones del mundo.

Sin embargo, la reutilización de agua en agricultura genera una preocupación creciente por los denominados contaminantes emergentes, que no son eliminados en las plantas de tratamiento convencionales, y su posible incorporación a la cadena alimentaria a través del consumo de vegetales regados con aguas depuradas.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio ha sido evaluar la eficacia de un prototipo de regeneración de aguas residuales depuradas que permite la eliminación de contaminantes emergentes y de la contaminación biológica.

Posibilitando que el agua residual regenerada se convierta en una fuente alternativa de abastecimiento, económica y segura desde el punto de vista sanitario y medio ambiental, y resolviendo o minimizando la problemática del agua en regiones con déficit hídrico.

En la empresa se ha diseñado un prototipo que se compone de tres etapas: una filtración de discos que actúa como pretratamiento para las etapas posteriores de adsorción y desinfección ultravioleta; una etapa de adsorción formada por un lecho de carbón activado que permite la eliminación de los contaminantes emergentes contenidos en el agua; y una última etapa de desinfección formada por un reactor ultravioleta que permite la inactivación de los microorganismos.

El estudio del prototipo ha permitido determinar la eficiencia del tratamiento propuesto, concluyendo que éste puede considerarse una alternativa real para la eliminación de los contaminantes emergentes y la producción de un agua regenerada de calidad suficiente para la reutilización fiable y segura en agricultura. Los resultados de la eliminación de contaminantes emergentes y microorganismos patógenos son alentadores y permiten afianzar la confianza en la reutilización de aguas regeneradas convirtiéndolas en una fuente

alternativa de suministro fiable para los agricultores, asegurando una producción agrícola de calidad.

ABSTRACT

Water scarcity is one of the great challenges facing humanity, which is why the need to find new sources of water has become evident over the years, with unconventional sources being considered as a viable alternative to increase the resource.

In this sense, planned water reuse is becoming an integral component of water supply and sanitation projects in many regions of the world.

However, the reuse of water in agriculture generates a growing concern about the so-called emerging contaminants, which are not eliminated in conventional treatment plants, and their possible incorporation into the food chain through the consumption of vegetables irrigated with treated water.

Therefore, the objective of this study has been to evaluate the effectiveness of a prototype for the regeneration of treated wastewater that allows the elimination of emerging contaminants and biological pollution.

Making it possible for reclaimed wastewater to become an alternative source of supply that is both economical and safe from a health and environmental point of view, and solving or minimising the water problem in regions with a water deficit.

The company has designed a prototype that consists of three stages: a disc filtration that acts as a pre-treatment for the subsequent stages of adsorption and ultraviolet disinfection; an adsorption stage formed by a bed of activated carbon that allows the elimination of emerging contaminants contained in the water; and a final disinfection stage formed by an ultraviolet reactor that allows the inactivation of microorganisms.

The study of the prototype has made it possible to determine the efficiency of the proposed treatment, concluding that it can be considered a real alternative for the elimination of emerging contaminants and the production of reclaimed water of sufficient quality for reliable and safe reuse in agriculture. The results of the removal of emerging contaminants and pathogenic microorganisms are encouraging and strengthen confidence in the reuse of reclaimed water, making it a reliable alternative source of supply for farmers, ensuring quality agricultural production.

1. INTRODUCCIÓN.

El agua es esencial para la vida, sin embargo, es uno de los recursos más amenazados. A pesar de que el planeta tiene una gran abundancia de agua, el agua dulce es escasa y sus depósitos han sido profundamente afectados por la contaminación.

La distribución del agua en el planeta se puede ver en la Figura 1.

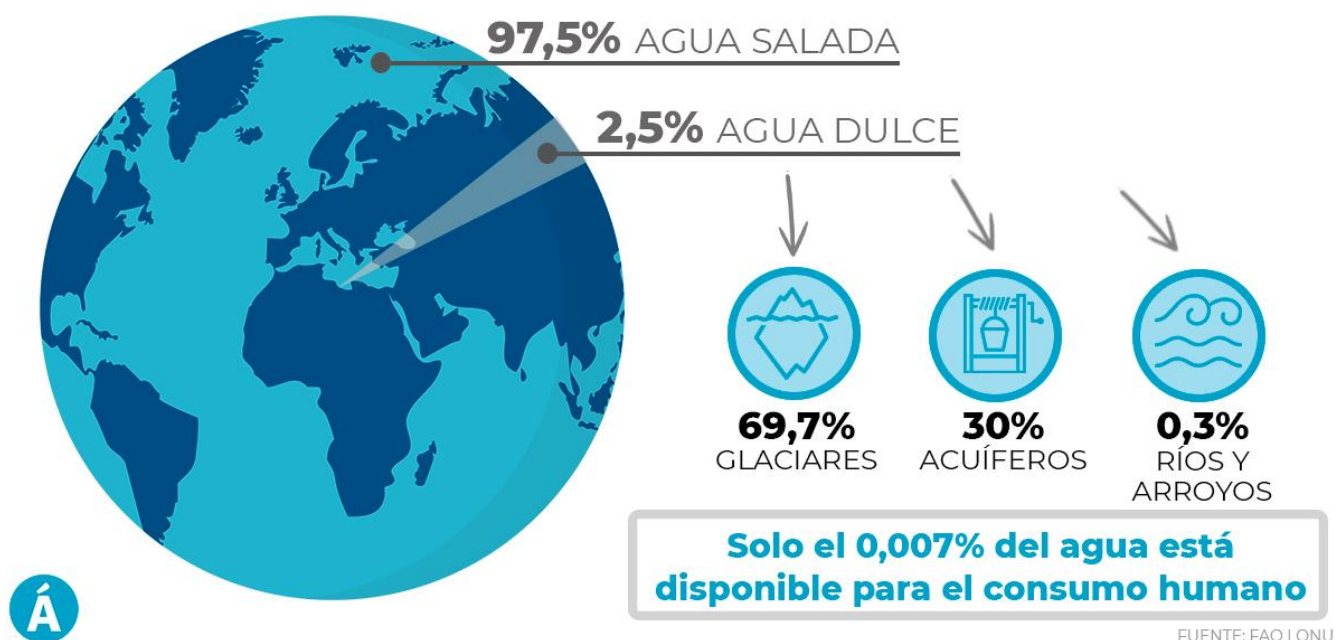


Figura 1. Distribución del agua en el planeta.

La Tierra tiene una disponibilidad de agua de 1.386 millones de kilómetros cúbicos, de los cuales el 97.5% es agua salada, es decir, solo 2.5% es agua dulce (35 millones de kilómetros cúbicos). De esa cantidad, solo el 0.007% del total está disponible para consumo humano (para beber, cocinar, para higiene personal, para la industria alimentaria...), debido a que el 69.7% de ese 2.5% de agua dulce está congelada en los polos o en los glaciares, el 30% está enterrada bajo la superficie, en acuíferos, y el 0.3% en los ríos y los lagos.

Los principales problemas surgen de su desigual distribución geográfica y temporal, que provoca grandes desequilibrios entre los recursos disponibles y la escasez de agua en múltiples áreas geográficas. La escasez de agua se produce cuando la cantidad de agua

dulce extraída de lagos, ríos o acuíferos no es suficiente para satisfacer todas las necesidades humanas o del ecosistema.

Más de 2.000 millones de personas viven en países que experimentan altos niveles de estrés hídrico. Estimaciones recientes muestran que 31 países sufren un estrés hídrico de entre el 25% (considerado como el umbral mínimo de estrés hídrico) y el 70%. España se encuentra en este grupo y le acompañan Italia, Bélgica, Alemania, Polonia y Bulgaria en la Unión Europea. Otros 22 países están por encima del 70%, y por lo tanto en condiciones de estrés hídrico grave, en este grupo encontramos países que se sitúan sobre todo en África del Norte y Oriente Próximo. Además, 15 países superan el 100% y, de estos, 4 presentan un estrés hídrico superior al 1.000%. Estos países, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Kuwait y Libia cubren en gran medida su demanda de agua mediante la desalinización.

En definitiva, casi un tercio de la población mundial vive en países con estrés hídrico alto, donde en promedio se utiliza más del 40% de la oferta disponible cada año, según informes del World Resources Institute.

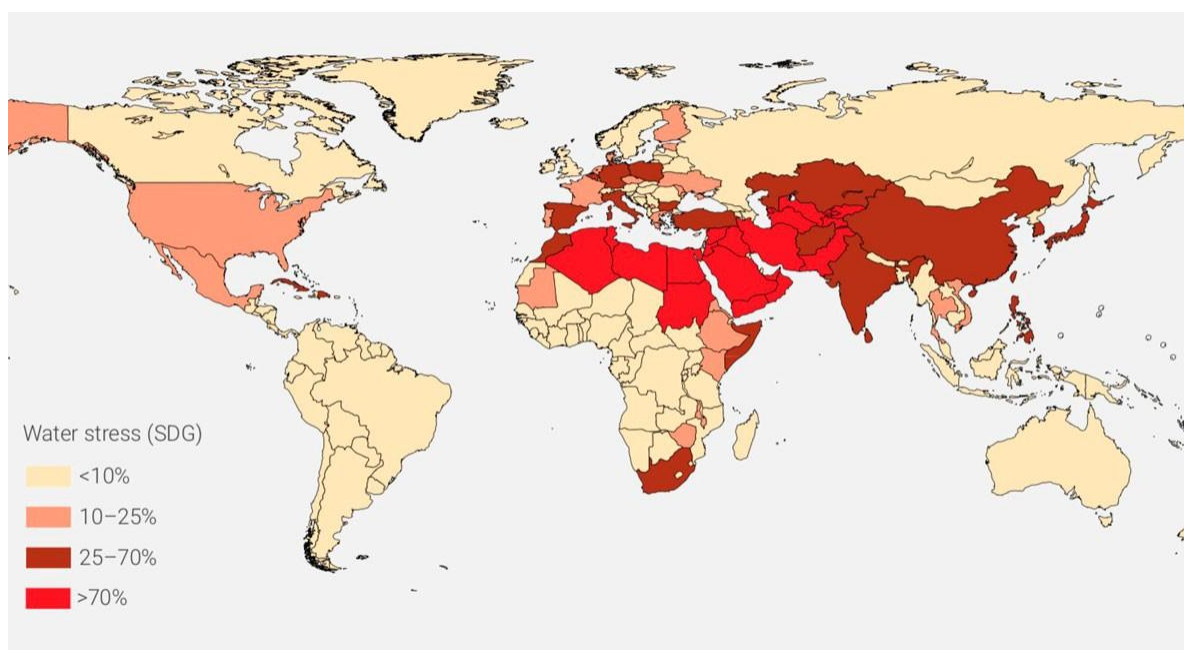


Figura 2. Mapa de estrés hídrico Mundial.

Se predice que los puntos críticos de estrés hídrico permanecerán e incluso crecerán debido a presiones continuas como la expansión de las zonas urbanizadas, el aumento de la población y cambio climático (European Environment Agency, 2018). Pronósticos como

estos resaltan la necesidad urgente de utilizar recursos hídricos alternativos, como aguas residuales tratadas (Deviller et al., 2020).

Una vez más en las nuevas tecnologías y en la innovación puede estar la respuesta. La reutilización de las aguas depuradas se puede convertir en un elemento esencial del ciclo natural del agua y, de hecho, la Directiva Marco del Agua (2000/60/CEE) contempla la reutilización de las aguas depuradas como medida para solucionar los problemas de la escasez de agua.

La reutilización es especialmente valiosa para el sector agrícola puesto que es el sector que más recursos hídricos consume, más del 70% de los recursos disponibles. La reutilización de aguas residuales depuradas garantiza la disponibilidad de agua reduciendo la incertidumbre asociada, lo que se traduce en múltiples ventajas para el sector agrícola:

- Supone disponer del recurso con un caudal prácticamente constante e inagotable, que no depende de la estacionalidad de las lluvias ni de periodos de sequía. Por lo tanto, se trata de un recurso estable que permite dar una mayor garantía de disponibilidad a los agricultores permitiendo tomar mejores decisiones de inversión y producción basadas en criterios estratégicos y no marcadas por la disponibilidad hídrica.
- Ayuda a la conservación de los recursos naturales, reduciendo la demanda de agua, aliviando la presión ejercida sobre ellos. Además, contribuye a reducir la cantidad de contaminantes que se descargan en los efluentes.
- La importante carga de elementos nutritivos de las aguas regeneradas reduce la inversión en fertilizantes y permite reciclar nutrientes mejorando la salud del suelo y disminuyendo los costes del cultivo.
- Reduce el “downside risk”. Éste es un término financiero asociado a pérdidas. De forma simplificada indica que en “un mal año” existe un riesgo de pérdidas económicas superior al beneficio obtenido si el año fuera “bueno”. Es un riesgo que se reduce cuando la incertidumbre decrece lo que incentiva las inversiones productivas.
- La no disponibilidad de recursos hídricos suficientes no sólo implica pérdidas productivas sino también una pérdida significativa del empleo agrario en el que se incluyen también los trabajos relacionados con el procesado de los productos. Por tanto, garantizar la disponibilidad de agua favorece la estabilización socioeconómica de los territorios.

- Contribuye a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU en materia de aguas, fomentando la economía circular y la gestión eficiente de los recursos hídricos.

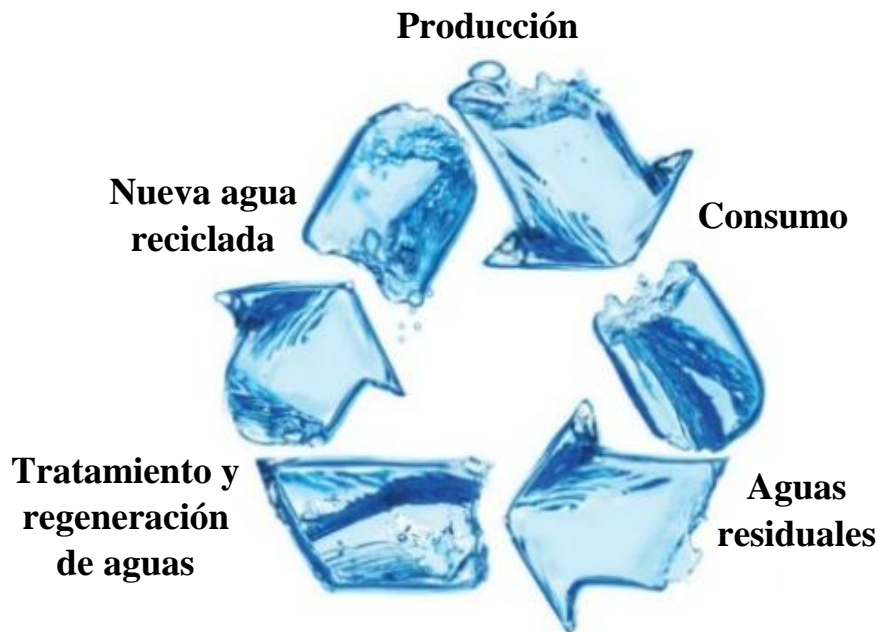


Figura 3. Reutilización de las aguas residuales como modelo de economía circular.

En concreto, el desarrollo de tecnologías que permiten la reutilización segura del agua en agricultura contribuye a lograr los siguientes objetivos de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible:

- **ODS 6:** Agua limpia y Saneamiento, en el que se promueve garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos, así como un aumento sustancial en la regeneración.

En particular la meta 6.3, hace hincapié en “mejorar la calidad del agua, reducir la contaminación, eliminar los vertidos y minimizar la liberación de productos químicos y materiales peligrosos, reducir a la mitad el porcentaje de aguas residuales no tratadas y aumentar sustancialmente el reciclaje y la reutilización segura del agua”

- **ODS 12:** Producción y consumo responsables, en el que se promueve la reutilización segura del agua a nivel mundial.

La eficiencia en el uso del agua mediante su reutilización contribuye al uso sostenible y la protección de los recursos hídricos, constituyendo un método alternativo de suministro de agua con menor impacto ambiental que los trasvases de agua o la desalinización. Se trata de una práctica de carácter eminentemente circular, que en el ámbito agrícola facilita, a su vez, la recuperación de los nutrientes presentes en las aguas urbanas depuradas. Nutrientes como el nitrógeno, el fósforo o el potasio que pueden aplicarse sobre los cultivos, reduciendo la necesidad de aplicaciones complementarias de abonos inorgánicos.

De hecho, la reutilización de aguas residuales para riego en la agricultura es, con mucho, el uso final más establecido para el agua recuperada (Drechsel et al., 2010). Sin embargo, a pesar de resolver la escasez de agua, la reutilización de aguas residuales puede generar riesgos para la salud pública si el tratamiento y el sistema de distribución no son adecuados. El principal riesgo está relacionado con el consumo de vegetales contaminados con microorganismos patógenos derivados del uso de aguas residuales no tratadas o inadecuadamente tratadas para el riego de cultivos (Fuhrmann et al., 2016).

Adicionalmente, en los últimos años, debido a la mejora de los métodos analíticos se ha identificado la liberación de los denominados “contaminantes de preocupación emergente” (CEs) en los cuerpos de agua despertando una gran preocupación. Son sustancias de uso habitual como productos cosméticos y de higiene personal, biocidas, drogas, fármacos... sustancias que no están reguladas y de las que se desconoce su grado de presencia, concentración e impacto en el medio ambiente, aunque hay sospechas de que pueden suponer un riesgo significativo. Hay que puntualizar que ni la liberación de CEs de las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas al medio ambiente ni su presencia en aguas residuales para su reutilización agrícola se han regulado hasta el momento (Rizzo et al., 2020), excepto en Suiza.

La legislación suiza tiene como objetivo reducir el 80% de los contaminantes de preocupación emergente en los efluentes de sus depuradoras de aguas residuales, para ello establece el seguimiento de una lista de 5 sustancias indicadoras (carbamazepina, diclofenaco, sulfametoxazol, benzotriazol y mecoprop). Esta legislación se aplica para las plantas de tratamiento de agua residuales de mayor tamaño: es obligatoria para aquellas de tamaño superior a 80 000 habitantes equivalentes, para las superiores a 25 000 que viertan a lagos usados como reserva de agua potable, o para plantas de más de 8000 habitantes equivalentes que viertan en ríos y arroyos con un porcentaje de agua proveniente de la

Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) superior al 10% de su caudal total (Rodríguez & Rato, 2017). Esta normativa, que es pionera exige que las plantas de tratamiento de aguas residuales implementen un proceso de tratamiento adicional, específicamente para la eliminación de microcontaminantes.

El monitoreo de los CE en los efluentes de las EDARs para reutilizarlos para el riego de cultivos es uno de los principales temas debatidos entre los científicos, los responsables políticos y las partes interesadas a nivel de la UE (Christou et al., 2017; Deng et al., 2019; Piña et al., 2020; Rizzo et al., 2018).

La seguridad de las aguas residuales tratadas para ser reutilizadas para el riego de cultivos es un tema relevante en todo el mundo. Recientemente, el interés ha aumentado a nivel de la UE y ha estimulado un debate entre los responsables políticos, científicos, profesionales, y otras partes interesadas, que ha concluido con la publicación en el Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE L177/32 de 05/06/2020) de la nueva normativa sobre reutilización de aguas depuradas a nivel europeo, el Reglamento (UE) 2020/741 sobre **"Requisitos mínimos para la reutilización del agua"**, que será de obligado cumplimiento en junio de 2023.

La finalidad de este Reglamento es garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para el riego agrícola, y de esta forma asegurar un alto nivel de protección del medio ambiente y de la salud humana, así como promover la economía circular y contribuir a los objetivos de la Directiva 2000/60/CE al hacer frente a la escasez de agua y a la consiguiente presión sobre los recursos hídricos.

Actualmente atendiendo a la literatura científica, las estaciones de tratamiento convencionales son poco efectivas para eliminar CE de manera integral. Cuando ingresan a una planta de tratamiento de aguas residuales, los fármacos no suelen estar completamente mineralizados. Se retienen parcialmente en el lodo o se metabolizan a una forma más hidrofílica pero aún persistente y, por lo tanto, pasan a través de la EDAR y terminan en las aguas receptoras (Radjenovic et al., 2007), constituyendo una preocupación particular cuando los efluentes se reutilizan para el riego de cultivos. Para minimizar de forma efectiva los CE, y microorganismos patógenos contenidos en las aguas, se deben implementar pasos de tratamiento avanzados en plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas convencionales, que permitan garantizar efluentes de alta calidad y, en definitiva, una producción agrícola sin riesgos.

En muchas ocasiones el agricultor se muestra reacio al uso de fuentes de agua alternativas, por el desconocimiento que se tiene de ellas, por miedo a que el agua regenerada haga disminuir el rendimiento de sus cultivos o por el impacto que puede tener en su mercado. Con la tecnología propuesta en este trabajo y los resultados derivados de este estudio, se pretende proporcionar tanto al agricultor como al consumidor final información y garantías de que es posible disponer de un agua regenerada de elevada calidad agronómica y conseguir producto final seguro.

Además, la bibliografía indica que un único método de tratamiento avanzado no es suficiente para minimizar este tipo de contaminación (Rizzo et al., 2020), con vistas a conseguir que las aguas residuales se reutilicen para un riego de cultivos más seguro. Sólo con una combinación inteligente de los sistemas existentes y un programa de monitoreo adecuado se puede alcanzar este reto.

Ante esta necesidad surge el Proyecto REUSAGUA. En este proyecto colaboran muchos de los principales agentes del sector del agua de la Región de Murcia, junto con Sistema AZUD, S.A. están Centro De Edafología y Biología Aplicada Del Segura (CEBAS-CSIC), Empresa Municipal de Aguas y Saneamiento de Murcia (EMUASA), HIDROGEA, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario (IMIDA), Centro Tecnológico de la Energía y Medio Ambiente (CETENMA), Entidad de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales de la Región de Murcia (ESAMUR), Universidad de Murcia (UM) y Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

El proyecto REUSAGUA contempla, como uno de sus principales objetivos, la reutilización eficiente y segura en la agricultura de aguas residuales procedentes de estaciones depuradoras municipales, planteando soluciones reales e innovadoras que creen además oportunidades de negocio en el sector.

Con este objetivo, se han diseñado dos plantas piloto para investigar procesos alternativos de regeneración de aguas depuradas para el seguimiento y eliminación de CE's y microorganismos patógenos. Ambas plantas se han instalado en Estaciones Depuradoras de Agua Residual (EDAR) a modo de tratamiento terciario e incluyen el uso de energías renovables buscando la mejora del rendimiento de depuración con bajos costes energéticos. En el presente estudio se analiza la línea de tratamiento de una de ellas.

2. OBJETIVOS.

El objetivo de este trabajo es analizar un tratamiento avanzado para la regeneración de aguas residuales urbanas depuradas, que permita controlar la liberación de CE's y microorganismos patógenos al medio, para favorecer la reutilización segura y sostenible de aguas regeneradas en la agricultura.

El análisis del prototipo se centra en el estudio de la eficiencia de las diferentes etapas que componen el tratamiento de las aguas residuales depuradas:

- Análisis de la filtración de discos como pretratamiento.
- Evaluación de la adsorción de contaminantes emergentes sobre carbón activado.
- Influencia del tiempo de retención hidráulico (TRH) y de los parámetros físico-químicos del agua residual en la eficacia de eliminación de los contaminantes emergentes.
- Eficacia de la desinfección mediante radiación ultravioleta.
- Influencia del TRH en la eliminación de microorganismos.

El proyecto REUSAGUA finaliza en diciembre de 2020, y hasta entonces, la investigación continuará centrada en la optimización de las diferentes etapas del proceso, así como la evaluación de costes de implantación, operación y mantenimiento. Sin embargo, actualmente la investigación se encuentra muy avanzada lo que ha permitido el desarrollo de este trabajo.

La puesta a punto de estas tecnologías permitirá además mantener a la Región de Murcia como pionera en la reutilización de aguas, generando conocimiento y contribuyendo a la Economía Circular regional.

Las conclusiones obtenidas del proyecto REUSAGUA, en su conjunto, permitirán someter a debate diferentes alternativas sostenibles de reutilización de aguas, proponiendo soluciones y tecnologías viables para su implantación en las EDAR convencionales.

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. UBICACIÓN.

El estudio se ha llevado a cabo en la plataforma experimental que el Centro de Edafología y Biología Aplicada Del Segura (CEBAS-CSIC) tiene situada anexa a la EDAR de Roldán-Lo Ferro-Balsicas, en Murcia, España. Esta plataforma cuenta con instalaciones adecuadas para realizar investigaciones relacionadas con el campo de la agricultura y el tratamiento de aguas.

La EDAR de Roldán-Lo Ferro-Balsicas ($37^{\circ}47'48.88''\text{N}$, $0^{\circ}57'33.63''\text{W}$), recibe los efluentes domésticos e industriales de las poblaciones de Lo Ferro, Roldán y Balsicas. Tiene una capacidad máxima de 10.221 habitantes equivalentes, aunque actualmente trabaja al 30% de su capacidad.

Esta EDAR se compone de un tratamiento secundario basado en fangos activos con aireación prolongada y posterior decantación. Los ensayos realizados durante el presente trabajo toman el agua precisamente a la salida del decantador secundario.

Adicionalmente la EDAR dispone de un tratamiento terciario basado en coagulación-floculación, filtración sobre lecho de arena y desinfección mediante radiación ultravioleta (UV) y el 100% agua tratada es aprovechada para riego agrícola en la zona del Campo de Cartagena.



Figura 4. Vista aérea de la EDAR de Roldán-Lo Ferro-Balsicas.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO.

El diseño experimental se basa en un prototipo autosostenible (Figura 5) diseñado y fabricado por AZUD y conectado directamente al decantador secundario de la EDAR, actuando así a modo de tratamiento terciario.



Figura 5. Prototipo diseñado por AZUD.

El prototipo dispone de una capacidad máxima de 1200 L/h autoabasteciéndose mediante energía solar gracias a su alta eficiencia energética. Incorpora un sistema de paneles solares y baterías de acumulación que permiten almacenar la energía y mantener la actividad del sistema incluso cuando la radiación solar es insuficiente.

La línea de tratamiento experimental combina tres tecnologías instaladas de forma secuencial y diseñadas para conseguir la máxima eficiencia hídrica y energética:

- La primera etapa actúa a modo de pretratamiento y consiste en una filtración por discos que garantiza la calidad del agua para la fase de adsorción posterior. Este diseño experimental incluye un sistema de limpieza asistido por aire alcanzando una óptima relación de agua filtrada frente al consumo de agua de limpieza y energía.
- La segunda etapa es la principal para tratar a los CE's y se basa en una adsorción mediante un lecho de Carbón Activo (CA) de cáscara de coco.
- Por último, el prototipo dispone de una etapa de desinfección para eliminación de microorganismos, mediante un reactor de luz UV.

3.3. CONTAMINANTES ESTUDIADOS.

Contaminantes emergentes: Se seleccionaron los contaminantes emergentes con más incidencia en las aguas residuales, los CE seleccionados para el estudio incluyen compuestos farmacéuticos pertenecientes a distintos grupos terapéuticos como antiinflamatorios, analgésicos, antiepilépticos y antibióticos, en concreto son: acetaminofén (ACT), carbamazepina (CBZ), diclofenaco (DCF), eritromicina (ERT), sulfametoxazol (SMX) , ketoprofeno (KTP) y naproxeno (NPX).

La Tabla 1 recoge la relevancia ambiental de los contaminantes emergentes seleccionados.

Tabla 1.Contaminantes emergentes estudiados.

Contaminante emergente	Relevancia ambiental
Acetaminofén	<p>De acuerdo con la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros de REACH, esta sustancia es dañina si se ingiere, puede dañar los órganos y es perjudicial para la vida acuática con efectos duraderos.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.002.870</p>
Carbamazepina	<p>De acuerdo con la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en las notificaciones de CLP, esta sustancia es dañina si se ingiere, se sospecha que daña la fertilidad o daña al feto, puede causar daño a los niños amamantados, puede causar una reacción alérgica en la piel y puede causar alergia o asma, síntomas o dificultades respiratorias si se inhala.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.005.512</p>
Diclofenaco	<p>Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros de REACH, esta sustancia causa daño a los órganos por exposición prolongada o repetida, es tóxica para la vida acuática con efectos duraderos, es dañina si se ingiere y se sospecha que daña la fertilidad o el feto.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.035.755</p>

Eritromicina	<p>No existe una clasificación armonizada y no hay peligros notificados por los fabricantes, importadores o usuarios intermedios de esta sustancia.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.003.673</p>
Sulfametoxazol	<p>Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en las notificaciones de CLP, esta sustancia causa irritación ocular grave, irritación de la piel, puede provocar una reacción alérgica en la piel, irritación respiratoria y síntomas de alergia o asma o dificultades respiratorias si se inhala.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/substance-information/-/substanceinfo/100.010.877</p>
Ketopofeno	<p>Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros de REACH, esta sustancia es tóxica si se ingiere.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/information-on-chemicals</p>
Naproxen	<p>Según la clasificación proporcionada por las empresas a la ECHA en los registros de REACH, esta sustancia es dañina si se ingiere, causa irritación ocular grave, se sospecha que daña la fertilidad o daña al feto, causa irritación en la piel y puede causar irritación respiratoria.</p> <p>Información: https://echa.europa.eu/es/information-on-chemicals</p>

Contaminantes microbiológicos: Para el seguimiento de los microorganismos se ha seleccionado un parámetro indicador para cada grupo de patógenos (bacterias, virus y protozoos), siguiendo la línea marcada por el **Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua**, donde se recogen los microorganismos indicadores (Tabla 2) para los controles de validación de las aguas regeneradas para el riego agrícola de la clase de calidad de aguas regeneradas tipo A (Comisión Europea, 2018) .

Tabla 2. Indicadores microbiológicos para evaluar el cumplimiento de los objetivos en la clase de calidad de aguas regeneradas A según el Reglamento (UE) 2020/741.

Microorganismos indicadores	Para
E.coli	Bacterias
Colifagos totales/ Colifagos F-específicos/ Colifagos somáticos / Colifagos	Virus
Esporas de Clostridium Perfringens / Bacterias formadoras de esporas reductoras de sulfato.	Protozoos

En concreto, para la evaluación del prototipo se han seleccionado los indicadores: E. Coli, Colifagos (totales y somáticos) y Esporas de Clostridium Perfringens.

3.4. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIMENTACIÓN

Durante la experimentación con el prototipo autosostenible de regeneración de aguas se han llevado a cabo dos tipos de ensayos:

- **Ensayos de fortificación**, con el objetivo de determinar las condiciones de operación idóneas para la eliminación de los contaminantes emergentes se estimó oportuno el dopaje de las aguas de alimentación procedentes del decantador secundario con los fármacos seleccionados en el estudio para comparar la eficiencia de eliminación en distintas condiciones de operación. El procedimiento consiste en dopar el agua de salida del decantador secundario de la EDAR con una concentración de 50 ppb y de 200ppb, respectivamente.

- **Seguimiento diario**, una vez establecidas las condiciones de operación óptimas, el agua de entrada al prototipo es la obtenida directamente a la salida del decantador secundario de la EDAR.

En ambos tipos de ensayos se ha realizado un seguimiento de la microbiología sin necesidad de alterar las concentraciones encontradas en el efluente de la depuradora.

La toma de muestras para el seguimiento de los ensayos se realiza a través de los diferentes puntos de muestreo instalados en el prototipo, según se indica en la Figura 6.



Figura 6. Puntos de muestreo del prototipo.

- **TM1:** Alimentación del prototipo. (Entrada a los Filtros de discos)
- **TM2:** Salida de los Filtros de discos / Entrada al Carbón Activo.
- **TM3:** Salida del Carbón Activo / Entrada al reactor UV.
- **TM4:** Salida del reactor UV / Salida del prototipo (efluente final).
- **TMD:** Drenaje.

Desde **TM1** se recoge la muestra de entrada al prototipo (alimentación de la planta), su análisis permite ver las características del influente.

Para analizar la etapa de filtración de discos la muestra se toma desde **TM2** y se compara con **TM1**.

TM3 recoge la salida del carbón activo, cuyo análisis y comparación con **TM2** determinará el grado de eliminación de contaminantes emergentes.

Por último, la muestra tomada desde **TM4**, permite el analizar la eficacia del reactor ultravioleta al compararla con **TM3**.

El análisis de las muestras se ha realizado a través de dos laboratorios externos acreditados: IPROMA, S.L. y LABORATORIOS MUNUERA, S.L.U.

Con los resultados de las muestras analizadas, se ha trabajado en el análisis de los resultados para la emisión de hipótesis y la obtención de conclusiones, determinando la eficacia del tratamiento propuesto.

Las conclusiones y resultados obtenidos por cada uno de los miembros del proyecto son puestos en común en reuniones periódicas, que además sirven para la planificación de los siguientes ensayos.

4. ETAPA DE FILTRACIÓN. FILTROS DE DISCOS.

4.1. IMPORTANCIA DE LA ETAPA DE PRETRATAMIENTO.

La etapa de pretratamiento del prototipo consiste en una filtración por discos que busca garantizar la calidad del agua sirviendo de protección de cara a las etapas posteriores, especialmente, para a la etapa de adsorción en lecho de carbón activo.

La presencia de sólidos en suspensión en el agua a tratar puede impedir la adsorción o interferir en ella, haciendo que ésta sea más lenta o incluso bloqueando el proceso. En la mayoría de los casos, la materia orgánica presente en las aguas residuales afecta negativamente a la adsorción de los compuestos que se pretenden eliminar (Önal et al., 2007; Saravia & Frimmel, 2008).

Generalmente, la adsorción de varios compuestos en un medio acuoso va a implicar la competición de las diferentes especies en disolución por la superficie activa del adsorbente, en este caso carbón activado (CA), viéndose disminuida la capacidad de adsorción de cada uno de los compuestos de forma individual. Este efecto competitivo es sustancialmente más acusado cuando la materia orgánica natural, presente en la matriz acuosa es similar en tamaño y estructura al compuesto de interés (Hepplewhite et al., 2004). Asimismo, algunos autores también atribuyen este descenso en la capacidad de adsorción al bloqueo de los poros, que reduce la superficie específica disponible para la adsorción (Al Mardini & Legube, 2010; Joseph et al., 2011; Zoschke et al., 2011)

En este contexto se debe mencionar el trabajo de Yu et al. (Yu et al., 2008), en el que estudian la adsorción de naproxeno, carbamazepina y 4-n-nonilfenol sobre dos tipos de carbón activado, encontrando que la materia orgánica natural tiene gran efecto, descendiendo la capacidad de adsorción de los contaminantes orgánicos.

Los filtros de discos AZUD HELIX AUTOMATIC se presentan como un elemento clave en el acondicionamiento del agua depurada y en la protección del lecho de CA, para poder asegurar la reutilización segura del agua dado que permiten mantener al CA en óptimas condiciones, independientemente de las fluctuaciones del agua de alimentación.

En el caso específico de la adsorción mediante CA, al evitar que los sólidos en suspensión alcancen la superficie del lecho, se protege la superficie activa del carbón y su microporosidad y, por tanto, su capacidad química de adsorción.

De esta forma se permite al carbón activo actuar únicamente como material adsorbente evitando que juegue un papel de lecho filtrante (reteniendo sólidos en suspensión (SS)) que no le corresponde y que resulta económicamente desfavorable.

Además, para asegurar la inactivación total de los microorganismos indicadores presentes en un agua es necesario reducir al mínimo posible el contenido de materia en suspensión y la turbiedad del agua a tratar, ya que las partículas ofrecen a los microorganismos una barrera protectora frente a la acción de los desinfectantes (Aguirre et al., 2004). De esta forma la etapa de filtración de discos contribuye a mejorar las dos etapas de tratamiento posterior, dando una mayor fiabilidad al proceso de regeneración.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA.

El agua proveniente del decantador secundario de la EDAR se dirige al prototipo y llega a la etapa de filtración de discos.

El funcionamiento del equipo de filtrado se divide en dos fases, filtración y limpieza.

Durante la fase de filtrado, se hace pasar el agua “bruta” a través de una pila de discos sometida a presión de forma que las impurezas quedan atrapadas entre los huecos que quedan entre los discos (filtración en superficie) y entre las geometrías grabadas en la superficie de los discos (filtración en profundidad). Se trata por tanto de una combinación de filtración en superficie y en profundidad. La acumulación progresiva de las partículas sólidas en el exterior del filtro va formando una “torta” que permite que se retenga no sólo el 100% de las partículas de tamaño superior o igual al grado de retención marcado por el disco sino

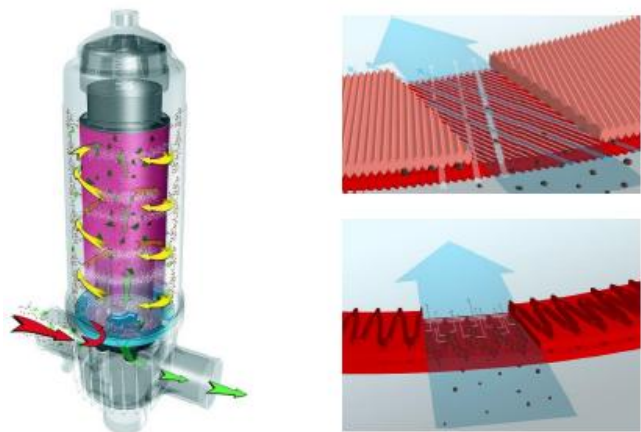


Figura 7. Equipo en fase de filtrado.

también un elevado porcentaje de partículas de tamaño inferior.

Este ensuciamiento de la columna de discos también provoca un aumento de la diferencia de presión entre la entrada y la salida del filtro (pérdida de carga) y cuando la pérdida de carga es demasiado alta, es necesario limpiar el filtro.

La fase de limpieza, en el caso del equipo instalado en el prototipo, es un proceso de autolimpieza apoyado por aire asistido. En él, las válvulas de contralavado, que incluye cada uno de los 3 filtros instalados en el equipo, van a permitir que el fluido de limpieza circule en sentido inverso al de filtración, es decir, de dentro hacia afuera a través de los discos. Con esta inversión del flujo a través del elemento filtrante, se consigue la descompresión de la columna de discos y la proyección de agua a gran velocidad contra los discos descomprimidos, lo que crea un efecto de limpieza tangencial que expulsa a las partículas atrapadas en su superficie.

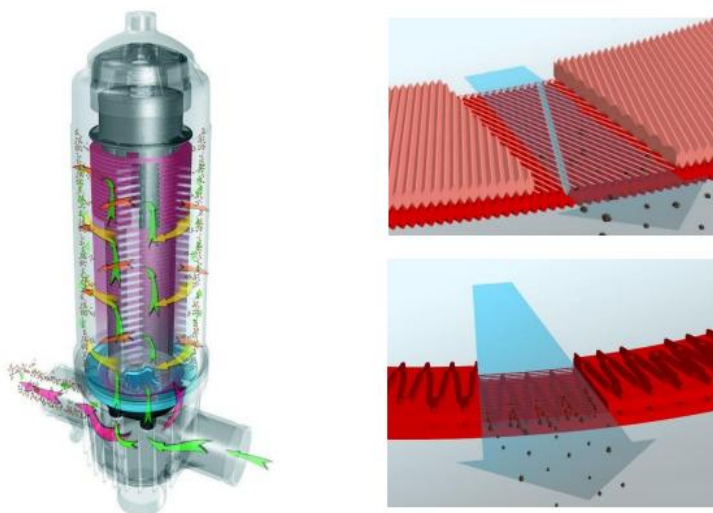


Figura 8. Equipo en fase de limpieza.

Esta limpieza, al ser asistida por aire implica que, durante la fase de filtración, un pequeño volumen del agua filtrada por el primer filtro se almacena en un tanque auxiliar específico y, cuando la fase de autolimpieza se activa, es ese volumen de agua junto con una inyección de aire a presión lo que se emplea para la descompresión y limpieza de los discos.

El sistema de limpieza Asistido por Aire (AA) permite a los filtros de discos trabajar con elevadas cargas de sólidos, incluso siendo éstos de naturaleza compleja (sólidos orgánicos, filamentosos, deformables...) y



Figura 9. Proceso de limpieza Asistido por Aire (AA)

emplear discos con bajos grados de filtración sin que ello repercuta posteriormente en la recuperación del sistema.

El sistema asistido por aire ha permitido:

- Reducir la presión de trabajo durante todas las fases del proceso, facilitando la consecución de los objetivos de eficiencia y sostenibilidad requeridos.
- Reducir el tiempo del proceso de contralavado, gracias al uso de la mezcla aire-agua como agente de limpieza.
- Alcanzar una elevada ratio entre el agua filtrada y los recursos invertidos.
- Y realizar todo el proceso con la mayor autosuficiencia basada en una energía renovable.

Por otra parte, la tecnología HELIX que AZUD incorpora para sus filtros automáticos, permite retardar la frecuencia de las limpiezas gracias al efecto helicoidal que adquiere el agua al entrar en el filtro. Esto junto con el hecho de disponer de un sistema de limpieza de alta eficiencia ha permitido no solo trabajar con aguas complejas, sino también garantizar que el proceso de limpieza sea totalmente efectivo, es decir, el filtro se recupera totalmente independientemente del grado de filtración y sin fenómenos acumulativos de ensuciamiento, lo que podría llegar a generar un efecto negativo sobre la pérdida de carga.

4.3 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE FILTRACIÓN POR DISCOS.

Un filtro es un dispositivo capaz de retener el material particulado contenido en un fluido, y en el caso de un filtro de discos se retienen los sólidos suspendidos en un fluido en la superficie, tanto externa como interna, de una columna comprimida de discos planos, en cuyas caras hay grabadas ciertas geometrías que permiten la circulación del fluido y la retención de las partículas en función de su tamaño o naturaleza.

Los elementos que componen un filtro de discos son:

- El cuerpo (1), que es la base del filtro donde se conectan los colectores de entrada y salida de agua al mismo.
- El elemento filtrante (2), que consiste en una estructura de soporte para la columna de discos, así como la propia columna de discos. La estructura de soporte dispone de una geometría específica que permite que el agua fluya en el sentido adecuado

durante el proceso de filtración, es decir, de fuera de la columna de discos hacia el interior de esta; y también permite el paso inverso durante el proceso de limpieza.

- La tapa (3) y la abrazadera (4), para el cierre hermético del filtro.

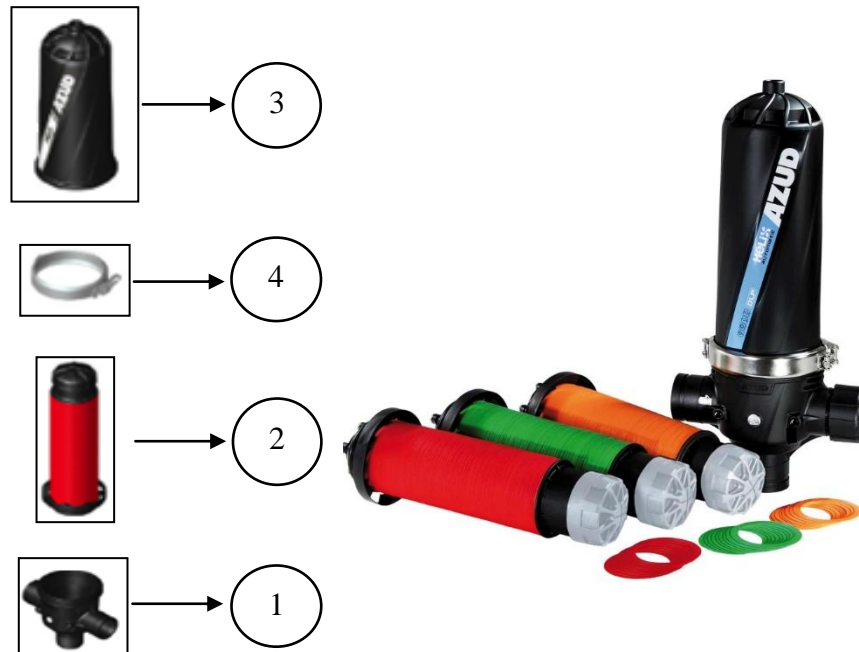


Figura 10. Componentes de un filtro de discos.

Un equipo de filtrado automático incluye uno o varios filtros, así como los colectores de entrada y salida de agua, para permitir la circulación del fluido, además de ciertos elementos auxiliares necesarios para el proceso de limpieza, como válvulas, tomas de presión, depósito auxiliar, etc.

Para el módulo experimental de este proyecto se ha fabricado y diseñado un equipo de filtración de discos específico para alcanzar la máxima compacidad. Se han combinado 3 estaciones de filtrado en serie con distintas capacidades de retención de partículas y totalmente independientes en su funcionamiento.

La disposición en serie permite que el agua permeada de un filtro pase al siguiente. La Figura 11 muestra la etapa de filtración instalada en REUSAGUA.



Figura 11. Sistema de filtración de discos con limpieza AA

El sistema incluye 3 presostatos diferenciales, uno en cada etapa de filtrado, con ellos se regula el punto de consigna de la presión diferencial al que se activa la limpieza de cada una de las etapas de manera independiente. El valor establecido en los ensayos fue de 0,6 bar para las 3 etapas.

En la Figura 12 podemos ver una imagen de los presostatos diferenciales instalados en el prototipo.

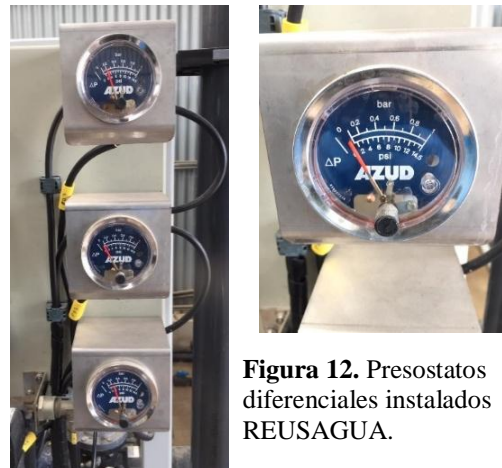


Figura 12. Presostatos diferenciales instalados REUSAGUA.

5. ETAPA DE ADSORCIÓN. LECHO DE CARBÓN ACTIVADO.

5.1. IMPORTANCIA DE LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.

Los Contaminantes de Preocupación Emergente son microcontaminantes orgánicos de origen sintético o natural que tienen el potencial de llegar al medio ambiente causando efectos adversos sobre los ecosistemas y/o la salud humana, estando hoy en día la mayoría de ellos no regulados (Murphy et al., 2012; Richardson, 2003; Thomaidis & Asimakopoulou, 2012). Este tipo de contaminantes incluyen pesticidas, productos farmacéuticos, drogas, hormonas sintéticas y naturales, productos de cuidado personal y microorganismos resistentes, es decir, bacterias y genes resistentes a antibióticos (ARB y ARG).

El presente estudio se ha centrado en ciertos compuestos farmacéuticos.

Una de las principales fuentes de productos farmacéuticos en los sistemas de agua es la descarga de efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR) en el medio ambiente (Yang et al., 2017). Los productos farmacéuticos y sus subproductos, que están presentes en las aguas residuales y en las aguas superficiales, se están convirtiendo en un problema ambiental (Delgado et al., 2019). Su impacto es de particular relevancia para la reutilización de aguas residuales en entornos agrícolas debido a la absorción y acumulación de CE en los cultivos alimentarios y la consiguiente difusión en la cadena alimentaria (Krzeminski et al., 2019).

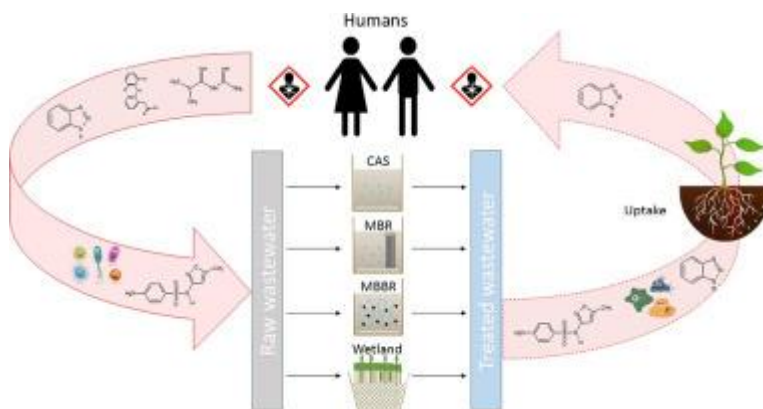


Figura 13. Difusión de los CE en la cadena alimentaria (Krzeminski et al., 2019).

El efecto en el medio ambiente dependerá de su concentración, y de otros factores como son: su persistencia, la bioacumulación, el tiempo de exposición o los mecanismos de biotransformación o eliminación. Es importante remarcar, que algunas sustancias en el medio ambiente sufren transformaciones, dando metabolitos o subproductos más peligrosos que los compuestos originales (Calza et al., 2006; Esplugas et al., 2007; Oller et al., 2011; Vogna et al., 2004).

Estos compuestos, de diversos orígenes y naturaleza química, pueden estar presentes en aguas en bajas concentraciones y causar diversos efectos en los organismos, tales como la toxicidad crónica, disrupción endocrina y bioacumulación.

Su problemática esencial viene dada por el hecho de que su eliminación completa en las EDARS no está asegurada con los tratamientos biológicos convencionales. Varios de estos compuestos permanecen en el medio ambiente, incluso después de los procesos de tratamiento del agua (Katsigiannis et al., 2015).

La siguiente Tabla muestra la eficiencia de eliminación de un proceso de depuración convencional para una serie de fármacos.

Tabla 3. Rendimientos de eliminación de distintos fármacos a través de un proceso de depuración convencional mediante fangos activos (Radjenovic et al., 2007).

Grupo terapéutico	Compuesto	% Eliminación
Analgésicos y antiinflamatorios	Acetaminofén	98.4
	Diclofenaco	50.1
	Ibuprofeno	82.5
	Indometacina	23.4
	Ketoprofeno	51.5
	Mefenamic ácido	29.4
	Naxopreno	85.1
	Propifenazone	42.7
Antiepilépticos	Carbamazepina	*Sin eliminación
Antibióticos	Eritromicina	23.8
	Ofloxacina	23.8
	Sulfametoxazol	55.6

Las plantas convencionales de tratamiento de aguas residuales se componen, en general, de un sistema de pretratamiento, tratamiento primario, y tratamiento secundario. Son plantas que fueron diseñadas para la eliminación de parámetros contaminantes convencionales, tales como DBO₅, DQO, sólidos suspendidos totales o nutrientes, teniendo una capacidad limitada en cuanto a la eliminación de contaminantes emergentes que se encuentran presentes en las aguas residuales urbanas (Prados Joya, 2014; Ratola et al., 2012).

Los riesgos que plantean los CEs para la salud humana mediante la utilización de aguas residuales no tratadas o tratadas de manera insuficiente en el riego agrícola exigen una atención especial. Por consiguiente, se han de proporcionar recursos hídricos de buena calidad para el riego agrícola y otros usos, lo que conlleva nuevos desafíos en términos de selección adecuada de tecnologías, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental. Es por todo ello la importancia de esta etapa en el tratamiento propuesto.

5.2. DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA.

Uno de los adsorbentes más utilizados es el carbón activado, se trata de un medio adsorbente de gran interés industrial debido a sus reconocidas propiedades: gran área superficial y alta porosidad. La razón de sus grandes posibilidades hay que buscarla en las propiedades químicas y texturales de la superficie de este material. Además de ser un componente que presenta un compromiso técnico-económico muy favorable.

La naturaleza del material precursor del carbono, así como los métodos de síntesis y condiciones de operación del proceso para la activación son factores primordiales para las características químicas y estructura interna de los poros (Tsai et al., 2000).

Entre las alternativas propuestas para la eliminación de los denominados contaminantes de preocupación emergente, la adsorción sobre carbón activado tiene, por lo general, impactos más bajos que la ozonización y que la ósmosis inversa y UV. Se considera la mejor opción a largo plazo, ya que consume menos electricidad (Y. Li et al., 2019; Rahman et al., 2018). La adsorción es interesante ya que la eficiencia de eliminación de los microcontaminantes del agua es en general buena y se evitan los productos de transformación, además los impactos se pueden reducir significativamente si se considera la regeneración y reutilización del CA en el proceso. También es importante la versatilidad de este

tratamiento. En comparación con otros métodos de tratamiento de aguas residuales, el proceso de adsorción de carbón activado ha demostrado ser más frecuente y más fácil de configurar experimentalmente (Tan et al., 2007).

En los últimos años, la síntesis de carbón activado a partir de residuos agroindustriales ha promovido un creciente interés en investigaciones científicas para el uso de materiales que comúnmente son desechos (Kadirvelu & Namasivayam, 2003).

Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC), el CA se puede clasificar en función del tamaño de poro:

- Macroporoso (≥ 50 nm)
- Mesoporoso (2–50 nm)
- Microporoso (≤ 2 nm)

Específicamente en REUSAGUA se utiliza un lecho de carbón activo de cáscara de coco microporoso, térmicamente activado, con el que se pretende conseguir la adsorción específica de los CE's del agua residual.

Durante la etapa de adsorción sobre carbón activo, el agua a tratar se hace pasar a través del lecho granular, a la velocidad adecuada para asegurar el tiempo de contacto necesario. Los mecanismos de adsorción son:

- Fisisorción: Ocurre cuando las interacciones electrostáticas son debidas a las fuerzas de Van del Waals como las interacciones tipo dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido o fuerzas de dispersión. En este tipo de adsorción, la molécula adsorbida no se encuentra fija en un lugar específico de la superficie, sino que está libre para moverse en la interfase. En la mayoría de los casos, la adsorción física es fácilmente reversible y está acompañada por el decrecimiento en la energía libre y en la entropía de adsorción del sistema, por lo que el proceso es exotérmico.
- Quimisorción: tiene lugar mediante enlaces químicos, dando lugar a fuerzas de interacción mayores. Suele ser irreversible debido a que ocurren modificaciones de las estructuras químicas del adsorbato y del adsorbente.

Las columnas de lecho fijo con carbón activo granular son las más comunes para tratar aguas residuales. Este tipo de reactor presenta varias ventajas, a saber: modo de operación simple, efectividad y facilidad de ampliación para aplicaciones industriales (de Franco et al., 2017).

El proceso de limpieza física se lleva a cabo mediante retrolavado, siendo la operación de mantenimiento más importante para el correcto desempeño del sistema. Se hace de forma que el agua es forzada a circular en el sentido inverso de la filtración a través del lecho, lo que hace que el medio se expanda y, al hacerlo, se desprenden las partículas de suciedad retenidas, que son evacuadas por el drenaje. En el caso del prototipo REUSGUA, las limpiezas están programadas en el tiempo.

Para que el proceso de limpieza sea efectivo debe conseguirse una buena expansión del lecho.

Al incluir un buen pretratamiento de discos, se ha observado que la colmatación del CA es muy baja, por tanto, las limpiezas programadas son de mantenimiento preventivo y no correctivo, es decir, se activa antes de que el carbón activo se ensucie.

En la Figura 14 vemos como sería el proceso de funcionamiento y limpieza del lecho adsorbente.

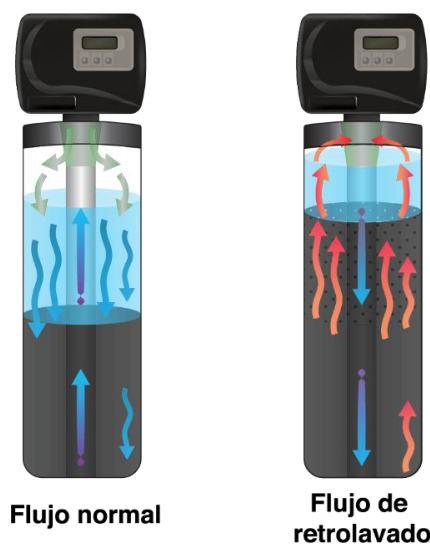


Figura 14. Proceso de funcionamiento y limpieza de un lecho de CA.

El carbón activo permite la adsorción de una amplia gama de compuestos, razón por la cual se considera un adsorbente “universal”. Sin embargo, también debido a su escasa especificidad, la presencia de diversas sustancias en las aguas residuales que pueden entrar en competición con los CEs durante el proceso de adsorción, al igual que la presencia de distintos sólidos en suspensión, pueden reducir la superficie de contacto del carbón

modificando el equilibrio entre las fases sólido-líquido e influyendo negativamente en la eficiencia del tratamiento.

Una solución que optimiza la eficiencia de eliminación de CE_s del CA, en el prototipo diseñado por AZUD, es la implantación de un sistema de filtrado previo. Con el correcto acondicionamiento del agua a través de la filtración con discos, es viable prolongar la vida útil del carbón activo manteniendo su superficie activa libre de partículas y manteniendo su funcionalidad.

En la Figura 15 se muestra el lecho de carbón activado instalado en el equipo.



Figura 15. Lecho de CA instalado en el equipo.

5.3. CARACTERÍSTICAS DEL LECHO DE CARBÓN ACTIVO

Para la selección del carbón activado es necesario realizar un análisis completo del agua a tratar que nos permita conocer las características de los contaminantes a retener. Conocer las características del adsorbato es un factor que puede mejorar la capacidad de adsorción.

El carbón activo utilizado en el prototipo es CG900, está fabricado a partir del huesillo de cáscara de coco. La calidad del carbón activado obtenido a partir de cáscara de coco, por el

método de pretratamiento con vapor y posterior activación química, supera la del carbón activado comercial no obtenida de fuentes renovables (Vidal et al., 2018).



Figura 16. Detalle de carbón activado de coco térmicamente activado.

Los carbones activos granulares, se aplican a una fase líquida o gaseosa, siendo más habituales los lechos granulares a través de los cuales pasa el agua.

En la siguiente tabla se muestran los principales parámetros de caracterización del CA CG900, utilizado en el prototipo.

Tabla 4. Principales parámetros con los que se especifica un carbón activado para el tratamiento de agua.

Especificaciones	Valor típico	Método
Aspecto	Granulado negro de forma irregular	--
Estado físico	Sólido	--
Solubilidad en agua	Insoluble	--
Número de Yodo	900 mg/g	ASTM 4607
Contenido en cenizas (máx)	3%	ASTM 2866
pH del extracto acuoso	Alcalino	ASTM 3838
Dureza (mín.)	98%	ASTM 3802
Humedad al ensacar (máx.)	4%	ASTM 2867
Densidad aparente	$520 \pm 30 \text{ kg/m}^3$	ASTM 2854
Granulometrías disponibles	8x30 US Std. Sieve	ASTM 2862

Descripción de los parámetros:

- El número de yodo, es un parámetro utilizado como medida en la adsorción de contaminantes en fase líquida, indicativo de la capacidad de adsorción del carbón activo y del área superficial. La cantidad de yodo adsorbido es proporcional al área superficial del carbón.
- La densidad aparente, es el peso en kg/m^3 de carbón totalmente seco en aire. Incluye el volumen de los poros y de los espacios entre las partículas del carbón. Su valor determina en gran parte el flujo de agua necesaria para lograr un buen retrolavado del CA.
- Para evaluar la dureza existen varios métodos, aunque desafortunadamente ninguno de ellos simula las condiciones reales que provocan la erosión del carbón en las diferentes etapas de su uso, como el transporte y el retrolavado.
- El análisis del contenido de cenizas (residuos sólidos obtenidos después de la combustión de un carbón activado) permite determinar el nivel de pureza del CA. La cantidad y composición de estas puede influir en la adsorción y en ciertas propiedades del carbón activado. En el caso de tratamiento de agua, la desventaja fundamental de las cenizas consiste simplemente en que cuanto mayor es su porcentaje, menor es la cantidad de carbón realmente efectivo.
- pH del extracto acuoso: Los compuestos solubles en agua pueden tener carácter ácido o básico. Por ejemplo, en el caso de un carbón que se activa con ácido fosfórico, el producto que sale del proceso de fabricación tiene fosfatos que al disolverse en agua se convierten en ácidos y por lo tanto disminuyen el pH. En otro ejemplo, un carbón activado de concha de coco, aunque se activa con vapor de agua y sin la intervención de reactivos químicos, contiene sodio y potasio en forma de óxidos, que provienen de la misma materia prima; al disolverse en agua, éstos forman hidróxidos que aumentan el pH. Si el pH del extracto acuoso es igual al del agua que va a tratarse, no ocurre alteración en esta última. Cuando es diferente, solamente se modificará el pH de los primeros litros tratados; sin embargo, en algunas aplicaciones es inaceptable esta variación. Para estos casos, algunos fabricantes ofrecen carbones con valores de pH similares al del líquido que va a tratarse. En su defecto, el usuario puede agregar un ácido o un álcali e inundar al carbón activado granular en agua hasta lograr el pH requerido, o bien, puede lavar el carbón hasta eliminar los compuestos solubles que modifican el pH; este último método puede llegar a requerir grandes volúmenes de agua.

- Humedad al empaquetar, este parámetro se especifica ya que cuanto mayor es su contenido, menor es el porcentaje de carbón neto que recibe el comprador.

- En cuanto a la granulometría, el carbón activado granular se fabrica en diversos rangos de tamaño. En nuestro caso las especificaciones son 8x30, es un carbón cuyas partículas pasan por la malla 8 pero no por la de 30. La especificación de malla que se utiliza con mayor frecuencia es la estándar americana (U.S. Std. Sieve).

El número de malla equivale al número de aberturas por pulgada lineal. Un carbón 8x30, que es el utilizado en el prototipo, tiene partículas de entre 0.595 y 2.38 mm como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 5. Especificaciones de mallas estándar americanas (U.S. Std. Sieve).

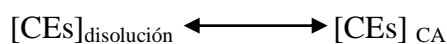
MALLA U. S	ABERTURA (mm)	MALLA U. S	ABERTURA (mm)
1/4	6.35	30	0.595
4	4.76	35	0.500
5	4.00	40	0.420
6	3.36	45	0.354
8	2.38	50	0.297
10	2.00	60	0.250
12	1.68	70	0.210
14	1.41	80	0.177
16	1.190	100	0.149
18	1.000	200	0.074
20	0.841	325	0.044
25	0.707	400	0.037

Cuanto menor es el tamaño de partícula, el carbón activado granular adsorbe con mayor rapidez, aunque ocasiona una mayor caída de presión. Lo rapidez se debe a que se acorta y se facilita el acceso del adsorbato a la superficie interna del carbón. Para dar una idea del efecto que tiene el tamaño de partícula en la cinética de la adsorción, un carbón activado granular comercial tamaño 12x40 normalmente adsorbe con el doble de rapidez que uno 8x30. Como conclusión cabe decir que en toda aplicación hay que buscar el intervalo de tamaño de CA cercano al de la partícula a eliminar, siempre y cuando la caída de presión provocada no sea excesiva.

5.4. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.

Hay multitud de parámetros que influyen en la eficiencia de eliminación de los CE's por el CA, a continuación, se citan algunos, aunque no todos han podido ser ensayados durante el presente trabajo:

- a. **Tiempo de contacto.** Teóricamente, al incrementar el tiempo de contacto se producen más interacciones fisicoquímicas entre el contaminante y el CA, aumentando la eficacia de la eliminación. El tiempo de contacto es una variable que puede ser controlada por el operador de la planta mediante el caudal de alimentación. Teniendo en cuenta que el volumen del lecho de carbón activado es una variable constante y conocida, un aumento del caudal disminuye el tiempo de retención en el lecho, afectando negativamente a la eficacia de eliminación, y viceversa. Esta variable se ha analizado en el presente estudio.
- b. **Concentración inicial de contaminante en el agua de alimentación.** La concentración de contaminante en el agua bruta no es un parámetro controlable por el operador en una situación real, aunque a lo largo de presente trabajo este parámetro se ha podido estudiar gracias a que se han realizado ensayos de fortificación, variando la concentración de contaminante en el agua a tratar. El proceso de adsorción es un equilibrio entre la cantidad de contaminante en disolución (en la corriente de agua) y la cantidad adsorbida en el CA.



En el inicio, $T=t_0$, la concentración de contaminante en disolución es elevada y por tanto se adsorbe una cantidad mayor de contaminante.

Al cabo de un tiempo, $T=t$, la concentración de contaminante adsorbido en el CA aumenta, se satura y llega a su equilibrio. A partir de este punto el CA no es capaz de seguir adsorbiendo, y desorbe CE's, pasando éstos a la disolución.

Cuando la concentración inicial, C_0 , de CE's en el agua aumenta, la capacidad de adsorción de contaminante por el carbón activo aumenta, hasta el punto en el que a pesar de aumentar la concentración inicial ya no aumenta la capacidad de adsorción del CA, este punto corresponde con la capacidad de adsorción máxima, $q_{\text{máx}}$.

- c. Otro de los aspectos que en la bibliografía aparece como variable influyente en la capacidad de adsorción del CA, es el pH. En el presente trabajo, no se ha experimentado con él. No se plantea el estudio de esta variable dado que se busca una solución industrial económicamente optimizada, por lo que se anteponen otras estrategias de optimización. Además, el objetivo es emplear el agua para el riego de cultivos por lo que se evita alterar su composición.

Sin embargo, se ha analizado la influencia del pH del agua residual. Como es sabido, el pH afecta propiedades superficiales de adsorbato y adsorbente, tales como: la carga de la superficie del material, el grado de ionización y especiación de los fármacos, que dependerán a su vez del pKa de los contaminantes y el pHpcz del carbón activado que se define como el valor de pH en el cuál el número de cargas positivas y negativas son iguales, de forma que la carga neta del CA es cero.

- d. Otro parámetro que también afecta al proceso de adsorción, aunque tampoco se ha experimentado en este trabajo, es la temperatura. El aumento de la temperatura de adsorción produce una disminución en la cantidad adsorbida de contaminante, lo que sugiere la naturaleza exotérmica del proceso de adsorción (García-Mateos et al., 2015).

5.5. MECANISMOS DE REGENERACIÓN DEL CARBÓN ACTIVO CONTAMINADO.

Una preocupación con respecto al uso de CA en el proceso de tratamiento de aguas residuales está relacionada principalmente con su gestión, después de la saturación o agotamiento (Cazetta et al., 2013).

En la Figura 17, se muestra cómo el CA ha ido disminuyendo su capacidad de adsorción, lo que parece deberse al desgaste del carbón activo: a medida que se han ido realizando ensayos, el carbón activo se va ha ido saturando.

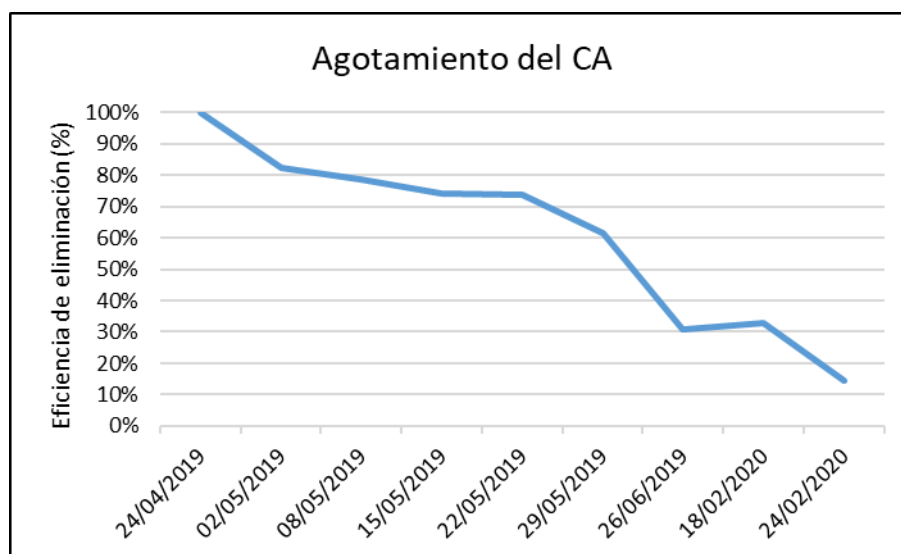


Figura 17. Agotamiento del carbón activo.

La Figura 17 representa el rendimiento de eliminación como la media de eliminación de todos los fármacos durante los ensayos en continuo a partir del efluente del secundario y con seguimiento diario.

Al alcanzar su capacidad de adsorción máxima, el CA deja de ser eficaz y, con mayor frecuencia, se envía para su eliminación y se reemplaza con material nuevo. El método de regeneración más habitual es el térmico, y se trata de un tratamiento costoso con importante consumo energético, existen tratamientos de regeneración alternativos, pero que aún no se aplican a escala industrial, por este motivo se opta por sustituir el CA gastado por CA nuevo. Sin embargo, el cambio continuo de material puede no ser viable ni económica ni medio ambientalmente, la eliminación del material agotado en el vertedero conduce a la posibilidad de que los contaminantes tóxicos se filtren al medio ambiente (Alvarez-Pugliese et al., 2019).

Desde el punto de vista medioambiental y de sostenibilidad, la regeneración de adsorbentes usados es una alternativa más atractiva (Durán-Jiménez et al., 2019). La regeneración de CA tiene como objetivo restaurar la capacidad de adsorción original mediante la eliminación de los contaminantes que se han acumulado en la superficie del carbono.

En la regeneración hay que atender a dos aspectos: en primer lugar, debe purificarse el carbón de todas las sustancias extrañas que le acompañan, y, en segundo lugar, hay que procurar no perder el carbón.

El mecanismo de regeneración es un paso fundamental en la sostenibilidad de los procesos de adsorción y se puede lograr a través de diferentes métodos basados en procesos térmicos, químicos, microbiológicos y electroquímicos, que se expondrán brevemente a continuación. (Alvarez-Pugliese et al., 2019)

- i. **Regeneración biológica:** El proceso se lleva a cabo mediante bacterias que se desarrollan en la superficie del carbón y se alimentan de la materia biodegradable adsorbida. La regeneración biológica suele ser lenta y requiere especies adsorbidas totalmente biodegradables, lo que no ocurre en muchos contaminantes del agua. Se trata de una tecnología que, por el momento, no se aplica a escala industrial.
- ii. **Regeneración térmica:** Se trata fundamentalmente de calentar el CA saturado para proporcionar la cantidad de energía necesaria para eliminar el adsorbato retenido. El adsorbato, dependiendo de su naturaleza, puede o no descomponerse.
A pesar de ser la tecnología de regeneración más ampliamente utilizada, el principal inconveniente de la regeneración térmica es que necesita un importante aporte de energía, ya que la temperatura debe mantenerse por encima de 1100 K. Además, una cantidad considerable de carbono (5–15%) que generalmente se pierde como consecuencia de la reducción de tamaño de las partículas por el desgaste.
Entre las desventajas de este método, se ha informado el consumo de energía y tiempo, y la pérdida de carbono (Robers et al., 2005).
- iii. **Regeneración química:** Nace como una alternativa para reducir los requerimientos energéticos y mejorar la eficiencia de regeneración. Puede llevarse a cabo mediante la desorción de adsorbatos usando solventes específicos o mediante la descomposición de especies adsorbidas, usando agentes químicos oxidantes. Su eficacia está fuertemente influenciada, por la solubilidad de las especies adsorbidas; aparte de esto se requiere recuperar las sustancias químicas utilizadas (Da'Na & Awad, 2017).
- iv. **Regeneración electroquímica:** Específicamente, la regeneración electroquímica del CA gastado ha ganado más atención en los últimos años porque funciona a baja temperatura, no se agregan productos químicos y abre la posibilidad de no alterar

las características estructurales y físicas del material. Consiste en la aplicación de una corriente eléctrica a través de un lecho agotado de carbón activado granular, dando como resultado dos procesos regenerativos principales (McQuillan et al., 2018).

Primero, comienza la desorción de los contaminantes dando como resultado un adsorbente libre de especies contaminantes. Segundo, las reacciones electroquímicas que ocurren en los electrodos y las partículas polarizadas de CA estimulan la degradación de las especies contaminantes, eliminándolas completamente del sistema.

Un proceso regenerativo electroquímico ideal promoverá ambos mecanismos de manera que se puedan evitar tratamientos adicionales de los compuestos desorbidos.

Es beneficioso que los contaminantes que estaban adsorbidos en el CA se oxiden en un producto no tóxico, o se mineralicen por completo y se eliminen del sistema.

La literatura indica que los tratamientos electroquímicos son un método efectivo para la regeneración de CA agotado, obteniéndose altas eficiencias de regeneración en unas pocas horas. Aun así, el desarrollo y la aplicación de esta tecnología ha progresado lentamente desde su exploración inicial hace más de dos décadas. Por lo que la implementación a gran escala para la regeneración electroquímica de CA aún no se ha realizado, en gran parte debido a la falta de comprensión y optimización del proceso de tratamiento

Por lo tanto, la regeneración del CA agotado es decisiva para garantizar que la adsorción sea el método más económico y ambientalmente aceptable para la eliminación de compuestos orgánicos del agua (Alvarez-Pugliese et al., 2019).

6. ETAPA DE DESINFECCIÓN. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA.

6.1. IMPORTANCIA DE LA DESINFECCIÓN DE AGUAS REGENERADAS.

A pesar de los avances tecnológicos en los tratamientos de agua y aguas residuales, el agua contaminada sigue siendo un importante vehículo de transmisión de patógenos entéricos de humanos y animales. Las aguas no tratadas se descargan normalmente en aguas superficiales. El tratamiento de desinfección adecuado es extremadamente vital para reducir una gran cantidad de microorganismos presentes en las aguas residuales. La desinfección es el proceso más importante desde el punto de vista de la inactivación de organismos patógenos (2004) et al., n.d.). Con una desinfección adecuada, el nivel de microorganismos en las aguas residuales se puede reducir a un nivel seguro, lo que permite que las aguas residuales se reutilicen en aplicaciones como el riego agrícola y urbano sin comprometer la salud humana.

Es difícil identificar con certeza la posible fuente de contaminación microbiológica de frutas y hortalizas frescas, ya que el origen del problema puede ser múltiple. Sin embargo, desde hace décadas, numerosos estudios han demostrado que el uso de agua de riego contaminada puede incrementar la frecuencia de microorganismos patógenos, detectados en el producto cosechado (Dunlop & Wang, 1961; Norman & Kabler, 1953).

Para analizar los resultados se deben tener en cuenta los requerimientos del Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas en España.

La calidad de agua más restrictiva para uso agrícola que recoge el Real Decreto se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Requisitos de calidad RD 1620/2007

Nematodos intestinales	Escherichia coli	Sólidos en suspensión (TSS)	Turbidez
1 huevo/10 L	1.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite

En el reciente reglamento de la Unión Europea, donde se establecen los requisitos mínimos para la reutilización de aguas residuales, la calidad del tipo A, la más restrictiva establece los límites de calidad del agua que se utiliza para el regadío de los cultivos de alimentos que se consumen crudos, en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas, y para los tubérculos que se consumen crudos. La Tabla 7 recoge los requisitos de calidad tipo A establecidos en el Reglamento Europeo.

Tabla 7. Requisitos de calidad Reglamento Europeo 2019.

Escherichia coli	DBO₅	TSS	Turbidez	Legionella
≤ 10 UFC/100 mL o inferior al límite de detección	≤ 10 mg/L	≤ 10 mg/L	≤ 5 NTU	< 1000 UFC/L

Esta normativa es más restrictiva que la normativa española (RD 1620/2007) en cuanto TSS y turbidez. Para las plantas regeneradoras de agua de nueva creación se llevará a cabo un control de validación, que implicará el seguimiento de los indicadores mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Controles de validación de las aguas regeneradas para riego.

Microorganismos indicadores	Objetivos de rendimiento de la cadena de tratamiento (reducción de log₁₀)
E.coli	> 5
Colifagos totales/colifagos somáticos	> 6
Esporas de Clostridium perfringens	> 4

Los valores indicados se deben cumplir en un porcentaje igual o superior al 90% de las muestras.

6.2. DESCRIPCIÓN DE LA ETAPA.

El agua proveniente de la etapa de carbón activo llega a un reactor UV, la radiación UV es clave para la eliminación de patógenos garantizando efluentes de alta calidad.

En esta etapa los microorganismos son inactivados por la acción de luz UV como resultado del daño fotoquímico a sus ácidos nucleicos. La radiación UV es absorbida por los nucleótidos, los bloques constitutivos del ADN y ARN de la célula.

La luz UV absorbida promueve la formación de enlaces entre nucleótidos adyacentes, con lo que se crean moléculas dobles o dímeros (Jagger, 1967). La formación de un número suficiente de dímeros dentro de un microorganismo impide que éste replique su ADN y ARN, lo que impide su reproducción.

Este sistema de desinfección presenta una serie de ventajas frente a los sistemas de desinfección química como la cloración. Los sistemas UV ocupan un área menor, son sistemas modulares, facilitando por lo tanto su expansión y mejoras. Son de operación y mantenimiento simple, con mínimo peligro de exposición para los trabajadores.

Además, el aspecto más interesante es que no generan subproductos problemáticos. No añade nada al agua excepto luz UV y por lo tanto no tiene impacto sobre la composición química o en el contenido de oxígeno disuelto en el agua.

Con esta etapa se completa el tratamiento del agua residual en el prototipo REUSAGUA, de forma que se produce un agua regenerada para su uso como fuente alternativa de suministro. En este caso para uso agrícola, afianzando el concepto de reutilización entre agricultores y consumidores, asegurando así una producción agrícola de alta calidad y disminuyendo los riesgos sanitarios y medioambientales.

6.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS REACTORES UV INSTALADOS.

La radiación UV se ha convertido en una tecnología de desinfección madura, confiable y respetuosa con el medio ambiente (H. Y. Li et al., 2017).

Se ha experimentado con dos tipos de configuraciones de reactor para el sistema de desinfección con luz UV: de contacto, y sin contacto.

Los componentes principales del sistema de desinfección con luz UV son las lámparas de vapor de mercurio, el reactor y los balastos electrónicos (ballasts). La fuente de luz UV son las lámparas de arco de mercurio de baja o mediana presión, bien sea de intensidad baja o alta. En ambos tipos de reactores, con contacto y sin contacto, el balastro –o caja de control– proporciona el voltaje de inicio para las lámparas y mantiene una corriente continua.

En los sistemas de canal cerrado sin contacto las aguas residuales fluyen a través de tubos transmisores de UV, generalmente de teflón. Las lámparas están fuera de los tubos y el flujo puede ser a presión o por gravedad.

Los sistemas de canal cerrado con contacto consisten en lámparas UV colocadas dentro de fundas de cuarzo transmisoras de UV, sumergidas dentro de un flujo de agua residual, en este caso. Las lámparas de mercurio están recubiertas con mangas de cuarzo para minimizar los efectos de enfriamiento del agua residual, es la configuración más común en el tratamiento de aguas residuales.

Es conveniente que se lleve a cabo un adecuado mantenimiento, en el que el flujo de agua a través de la unidad UV sea interrumpido y se lleve a cabo con dosificación de hipoclorito sódico mezclado con agua. La experiencia ha demostrado que la limpieza química es necesaria para eliminar completamente las incrustaciones acumuladas sobre las camisas de cuarzo (Kreft & Venosa, 1986).

Inicialmente se experimentó con un reactor sin contacto para la desinfección del agua, pero los resultados no fueron concluyentes.



Figura 18. Reactor UV sin contacto.

Posteriormente se experimentó con un reactor con contacto, que ha mostrado excelentes resultados, el análisis de esta etapa se basa en los resultados obtenidos únicamente con este reactor.

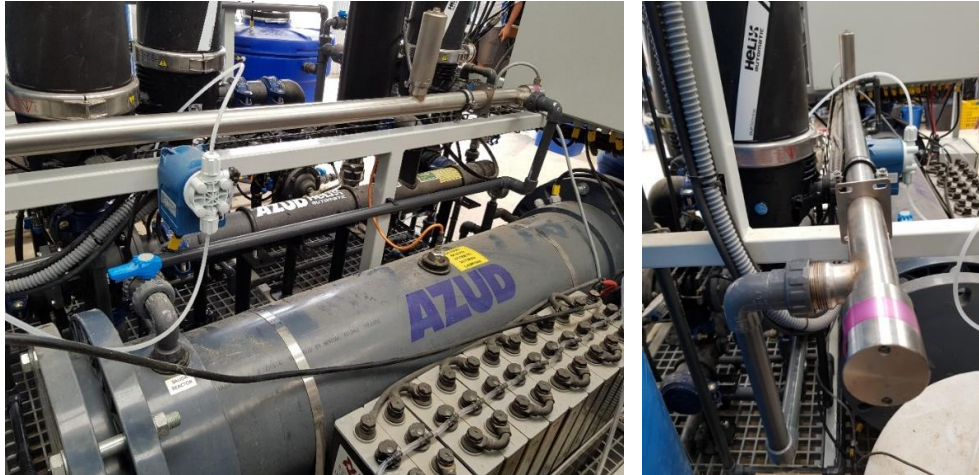


Figura 19. Reactor UV con contacto.

6.4. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN LA EFICIENCIA DE LA DESINFECCIÓN.

La eficiencia del sistema de desinfección con luz ultravioleta depende de las características del agua residual, la intensidad de la radiación, el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación y la configuración del reactor. Para cualquier planta de tratamiento, el éxito de las actividades de desinfección está directamente relacionado con la concentración de componentes coloidales y de partículas en el agua residual (Epa, n.d.).

1. Tiempo de contacto: El tiempo de desinfección es vital para asegurar un buen desempeño del sistema. A mayor tiempo de exposición mayor dosificación y por ende mayor porcentaje de eliminación de microorganismos patógenos (Acosta Castellanos et al., 2016).

El poder desinfectante de una lámpara UV, viene dado por el producto entre la intensidad o cantidad de energía por unidad de superficie y el tiempo de exposición o de contacto del agua. Este producto, la dosis, se puede expresar en microwatios segundo por centímetro cuadrado ($\mu\text{Ws}/\text{cm}^2$).

$$D = I \times T_c \quad (\text{Ec 1})$$

Donde,

- I, es la intensidad UV por unidad de superficie ($\mu\text{W}/\text{cm}^2$).
 - T_c , es el tiempo de exposición (seg).
2. Proximidad de la radiación. La intensidad de la radiación emitida por la lámpara se disipa a medida que la distancia de la lámpara respecto al agua aumenta. Una mayor intensidad hará más eficiente la desinfección.
 3. Calidad del agua a tratar: La presencia de sólidos suspendidos puede servir de barrera impidiendo que la radiación UV incida sobre los microorganismos.

El parámetro en el que se han basado los estudios ha sido el tiempo de exposición de los microorganismos a la radiación ultravioleta.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

7.1. ETAPA DE FILTRACIÓN DE DISCOS.

Al inicio de los ensayos en la etapa de filtración por discos se instalaron los siguientes grados de filtración:

FD1: MG 400 μm

FD2: MG 100 μm

FD3: WS: 5 μm

MG y WS son dos tecnologías de filtrado que hacen referencia a la geometría grabada en la superficie de los discos.

Con esta configuración se comprobó que no se efectuaban limpiezas en las dos primeras estaciones de filtración, lo que sugería que el tamaño de la mayoría de las partículas del influente estaba siendo inferior a 100 μm , por tanto, y para una mejor protección del filtro de 5 μm , se establecieron grados de filtración más restrictivos en las dos primeras etapas de filtrado.

Los criterios para la selección del grado de filtración se basan en garantizar la calidad exigida del efluente manteniendo un equilibrio entre la capacidad de retención y la frecuencia de limpiezas. El hecho de disponer de 3 etapas en serie para este equipo experimental permite una amplia flexibilidad a la hora de ajustar los grados de filtrado manteniendo la eficiencia hídrica del sistema.

Por tanto, buscando la combinación más adecuada para la calidad del agua procedente del tratamiento biológico de la EDAR, se establecieron los siguientes grados de filtración:

FD1: WS 50 μm

FD2: WS 20 μm

FD3: WS 5 μm

Con esta nueva configuración también se generaron pocas limpiezas, lo que significa que la decantación de la depuradora es muy buena y llegan muy pocos sólidos al prototipo. De hecho, en las muestras recogidas durante los ensayos, se comprobó que el rango de SST de

entrada al prototipo se sitúa entre 0.002-0.005 g/L, lo que indica el buen funcionamiento de la EDAR.

Cabe comentar que, para ampliar el estudio de esta tecnología, en paralelo, se están realizando ensayos de los equipos de filtrado en otra finca experimental que el Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS) tiene en Santomera, con el objetivo de someter al equipo de filtración a condiciones de funcionamiento más extremas, trabajando con aguas de peor calidad. Dicho estudio está en desarrollo actualmente.

7.2. ETAPA DE ADSORCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES.

La eficiencia de eliminación de CE's se evaluó utilizando la ecuación 2:

$$\% \text{ Eficiencia de eliminación} = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

- C_0 , es la concentración de contaminante en el influente (mg/L)
- C , es la concentración de contaminante en el efluente del carbón activo (mg/L).

7.2.1 ENSAYOS DE FORTIFICACIÓN.

Se comienza realizando los ensayos de fortificación, con el objetivo de establecer las condiciones de operación idóneas del prototipo.

Para ello se dopa el influente con una concentración inicial de 200 ppb de cada uno de los CE's seleccionados en el estudio.

A continuación, se evalúan diferentes parámetros que influyen de una manera u otra en la eficiencia de eliminación del carbón activo.

a) Efecto del tiempo de contacto en la eficiencia de eliminación.

El tiempo de contacto del agua con el carbón activado o tiempo de retención hidráulico (TRH) se puede calcular conocido el caudal a través de la siguiente fórmula (3).

$$\text{tiempo}_{\text{contacto}} = \frac{V}{Q} = \frac{S \cdot h_{\text{lecho}}}{S \cdot v_{\text{filtración}}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \quad (3)$$

Donde:

- V , es el volumen del lecho de carbón activo (m^3).
- Q , es el caudal que pasa por el prototipo (m^3/min).
- S , es la superficie del lecho de carbón activo (m^2).
- h , es la altura del lecho de carbón activo (m^2).
- $v_{filtración}$, es la velocidad de filtración (m/h).

La Tabla 9 muestra las condiciones de operación para los diferentes ensayos

Tabla 9. Condiciones de operación.

Caudal (m^3/h)	Tiempo de contacto (min)
0.5	27.35
1.2	11.40

La Figura 20 representa la eficiencia de eliminación para los dos tiempos de retención hidráulico que han sido ensayados.

Para la representación gráfica se simplifican los nombres de los contaminantes emergentes acetaminofén (ACT), carbamazepina (CBZ), diclofenaco (DCF), eritromicina (ERT), ketropofeno (KTP), naproxeno (NPX) y sulfametoxazol (SMX).

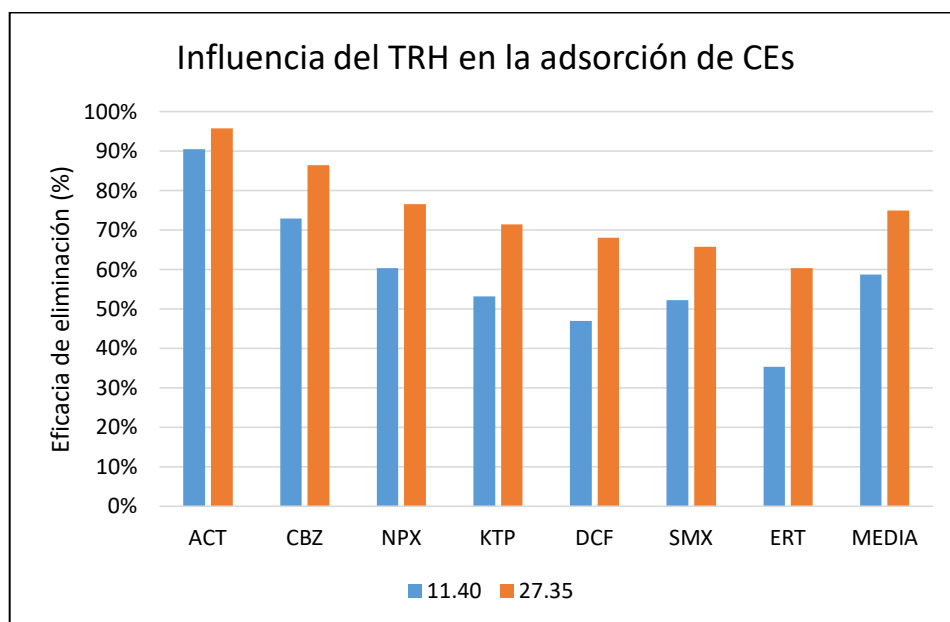


Figura 20. Influencia del TRH en la eliminación de CE's.

Los resultados muestran que **un mayor tiempo de contacto mejora los valores de adsorción y eficiencia del medio adsorbente**, ya que se producen más interacciones fisicoquímicas entre el adsorbente y el adsorbato, y por tanto las moléculas tienen mayor probabilidad de quedar adsorbidas en el lecho de CA. Este resultado está en concordancia con (Xu et al., 2018) ya que a un caudal más bajo, las moléculas de contaminante tienen tiempo suficiente para tener amplios contactos fisicoquímicos con el CA.

Se determina que, a un tiempo de contacto de 27.35 min, el mayor al cuál se ha experimentado, la eficacia de eliminación es superior al 60% para todos los CEs, siendo la media de eliminación del 75%.

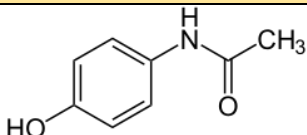
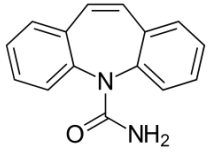
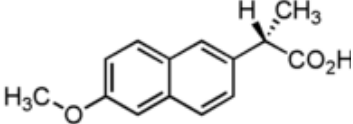
Estos resultados sugieren que el tiempo de contacto y, por tanto, el caudal parece estar entre los parámetros clave que influyen en la eliminación de CEs por el lecho adsorbente.

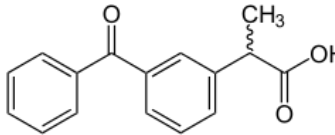
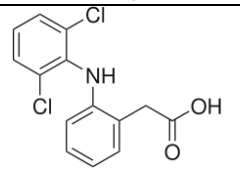
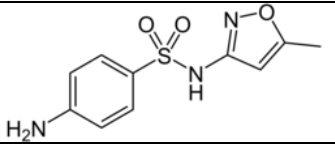
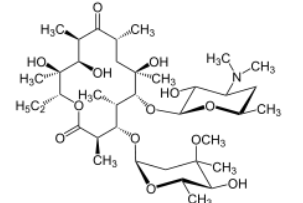
b) Efecto del pH del agua residual y de la masa molar el compuesto.

En este apartado se tomarán como referencia las mejores condiciones de operación extraídas del análisis previo, es decir, se toma como referencia el mayor tiempo de contacto (27.35 minutos), y se estudiará cómo el pH del agua residual y el peso molecular de los compuestos pueden influir en el proceso de adsorción.

Para este análisis es necesario conocer las características fisicoquímicas de los CEs, que se presentan en Tabla 10.

Tabla 10. Características fisicoquímicas de los contaminantes emergentes.

Contaminante emergente	Fórmula	Peso Molecular (g/mol)	Solubilidad en agua (mg/L)	pKa	Estructura química
Acetaminofén	$C_8H_9NO_2$	151.17	14000	9.38	
Carbamazepina	$C_{15}H_{12}N_2O$	236.27	18	13.9	
Naproxeno	$C_{14}H_{14}O_3$	230.26	1-3	4.15	

Ketoprofeno	$C_{16}H_{14}O_3$	254.28	51	4.45	
Diclofenaco	$C_{14}H_{11}NCl_2O_2$	296.15	2.37	4.15	
Sulfametoxazol	$C_{10}H_{11}N_3O_3S$	253.28	610	(1)=1.6 (2)=5.7	
Eritromicina	$C_{37}H_{67}NO_{13}$	733.93	4.2	8.88	

El valor del pH del punto de carga cero del CA (pHpzc) para el CA estudiado, es de 5.5, especificado por el fabricante.

Adicionalmente, el pH de todas las muestras analizadas en Roldán indica que el pH medio del agua residual tiene un valor de 7.4. Por tanto, se tiene un predominio de cargas negativas en la superficie del carbón, ya que el pH del agua es superior al pHpzc del CA.

Los resultados se muestran en la Figura 21.

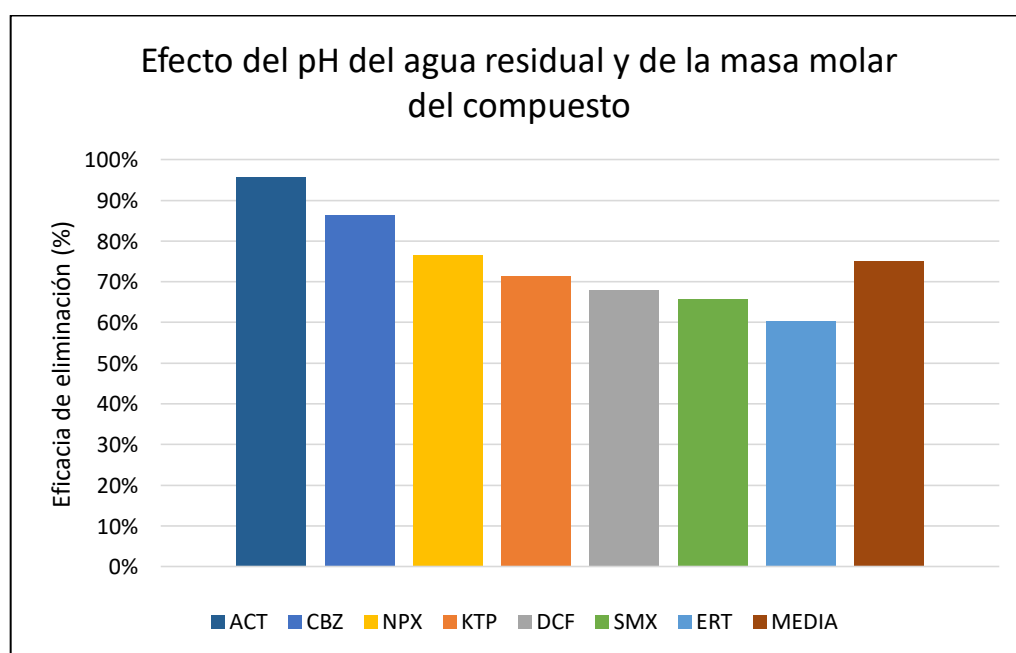


Figura 21. Eliminación de CEs trabajando a un caudal de 500 L/h.

Los compuestos que mayor eliminación presentan son carbamazepina, acetaminofen y naproxeno. Las moléculas de los dos primeros compuestos aceptan un protón ya que en estas condiciones se encuentran en forma catiónica ($\text{pH} < \text{pK}_a$ del contaminante), esto implica que haya una fuerza electroestática entre la molécula de contaminante y la superficie del carbón activo lo que parece favorecer la adsorción. En cambio, el resto de los contaminantes no ven su eliminación favorecida por las fuerzas electroestáticas.

En el caso de la eritromicina, a pesar de que su pK_a es alto y las interacciones electroestáticas también podrían promover la adsorción de este compuesto ya que se encuentra con carga positiva, y la superficie del carbón CG900 está cargada negativamente ($\text{pH}_{\text{pcz}}=5.5$) sin embargo, la capacidad de adsorción fue menor, lo que se ha atribuido a la mayor masa molecular del compuesto, que estaría impidiendo que las moléculas de este compuesto puedan acceder a la mayoría de los microporos del CA. Consideraciones similares se han tenido en cuenta en el artículo “Equilibrio y cinética de adsorción de compuestos farmacéuticos sobre carbón activado granular en solución acuosa” (Ocampo-Pérez, 2015).

En el caso del naproxeno, $\text{pK}_a = 4,15$, con valor menor de pK_a que el pH_{pzc} del CA, deberían analizarse otros factores a tener en cuenta que facilitan la adsorción de este compuesto, tales como la hidrofobicidad, cuyo valor puede medirse por el Kow y sirvió para el análisis de la eliminación en la tesis doctoral de M.A. Bernal-Romero (2020) “Reducción de microcontaminantes mediante procesos biológicos, tratamiento con membranas y carbón activado”.

Como otros estudios, estos resultados parecen indicar que el pH de la solución es uno de los parámetros más influyentes en el proceso de adsorción, ya que afecta la carga de la superficie adsorbente, así como el estado de ionización de las moléculas de adsorbato (Ajmal et al., 2020).

c) Efecto de la concentración inicial de contaminante.

Las reseñas bibliográficas indican que otra fuerza motriz en el proceso de adsorción es la diferencia de concentración entre el soluto, en el adsorbente y en la disolución. Un gradiente de concentración bajo causa un transporte lento, debido a una disminución del coeficiente de difusión o coeficiente de transferencia de masa; éste mejora al aumentar la

concentración inicial, ocasiona un transporte más rápido y, en consecuencia, aumenta la capacidad de adsorción (Ahmad & Hameed, 2010).

Por tanto, la concentración inicial de contaminante proporciona una fuerza impulsora importante para superar la resistencia de transferencia de masa del contaminante entre las fases acuosa y sólida: a mayores concentraciones iniciales de contaminante, el número de iones que compiten por los sitios disponibles en la superficie del adsorbente sería alto, lo que provocaría una mayor capacidad de adsorción del carbón activado.

Se ha estudiado la influencia de la concentración inicial (C_0) de contaminantes en el agua de alimentación trabajando a dos concentraciones iniciales diferentes, de 50 ppb y de 200 ppb. Esta comparación se realiza a los tiempos de residencia hidráulicos inicialmente estudiados de 11.4 y 27.35 min.

La Figura 22 representa la comparación de la eficiencia de eliminación (%) para ambas concentraciones iniciales.

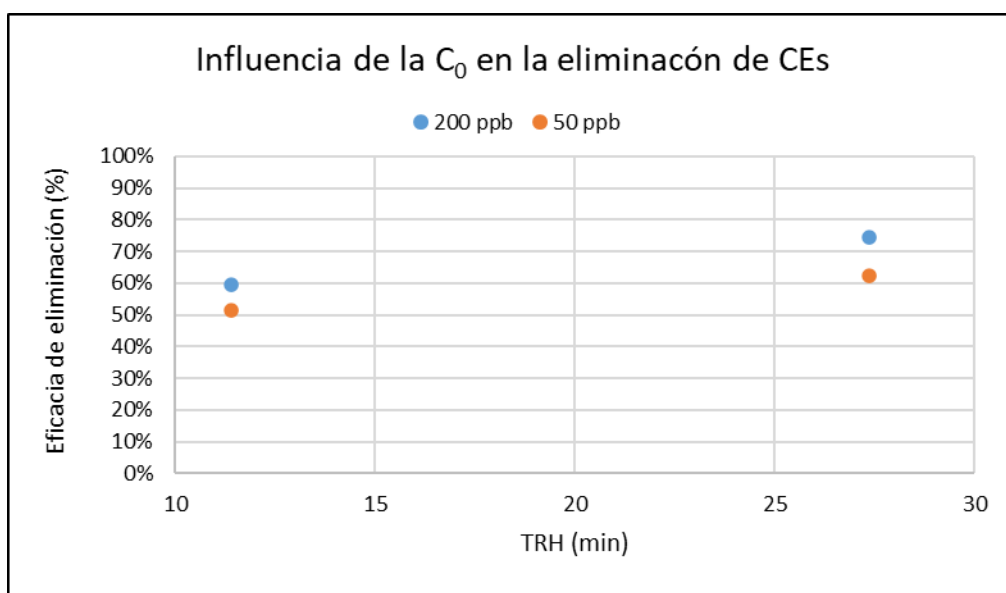


Figura 22. Influencia de la Concentración inicial de CE en la adsorción.

Los resultados, aunque preliminares dado que únicamente se realizó una repetición del experimento, muestran de forma evidente que **una mayor concentración inicial supone una mayor capacidad de adsorción del carbón activado** y sucede de la misma forma con el incremento del TRH.

Como se ha comentado con respecto al efecto de la concentración inicial, se debe a que el proceso de adsorción es un equilibrio, entre la cantidad de contaminante en disolución y la cantidad de contaminante adsorbida. Si aumentamos la concentración inicial de contaminante en disolución, el equilibrio se ve desplazado a la derecha, aumentando la capacidad de adsorción del CA. Para el incremento del TRH, desde 11.4 a 27.35, suceden las mismas tendencias y en este caso el aumento de eliminación fue debido al mayor tiempo de contacto.

En la bibliografía se describen situaciones de sobresaturación de los poros de la superficie del carbón cuando la concentración de contaminante en el agua a tratar es demasiado alta, lo que implica que una parte del contaminante no es retenida por el adsorbente (Calero1 et al., 2007), en nuestro caso no se ha llegado a dicha saturación del carbón activado.

7.2.2 ENSAYOS EN CONTINUO CON AGUA REAL DE LA EDAR.

En este caso el prototipo se alimenta del agua de salida del decantador secundario de la EDAR sin dopar. La figura 23 representa la concentración de los contaminantes emergentes seleccionados que se encuentran en el agua real. Se representan las concentraciones de los contaminantes emergentes a la entrada del prototipo (TM1 - ●) y a la salida del lecho de carbón activo (TM3 - ▲) para los ensayos a un caudal de 500 L/h.

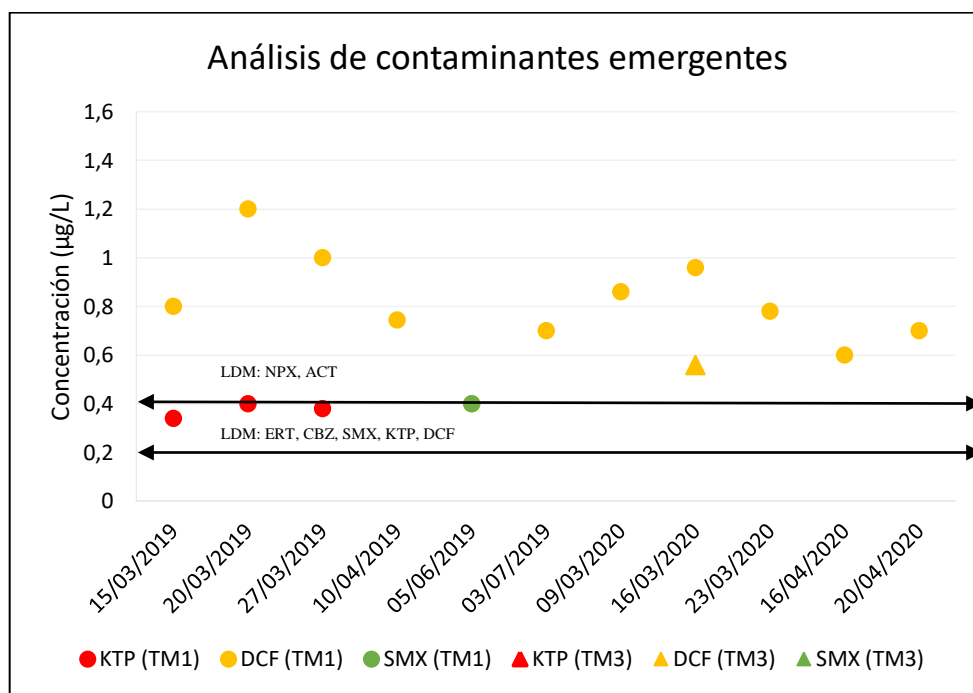


Figura 23. Concentración de los contaminantes emergentes durante los ensayos a un caudal de 500 L/h.

Los análisis de las muestras tomadas en los puntos TM1 y TM3, permiten cuantificar la eliminación de los contaminantes emergentes en condiciones reales. Se analizan los 7 contaminantes anteriormente citados.

Los ensayos de seguimiento diario indican que **el contenido de emergentes a la salida de la depuradora es muy reducido**. Sólo se han detectado tres de los siete CE en estudio, que son: el Diclofenaco, que ha aparecido en todos los muestreos, Ketoprofeno que ha aparecido en 3 de los 11 ensayos y el Sulfametoxazol que ha aparecido en 1 de los ensayos. Para el resto de los muestreos, tanto para Sulfametoxazol y Ketoprofeno así como para el resto de CE, los resultados a la entrada y a la salida del carbón activo están por debajo de los límites de detección del método.

La Figura 24 representa el porcentaje de eliminación de CE's tomando los valores medios de todos los contaminantes y representando ambos tiempos de retención ensayados.

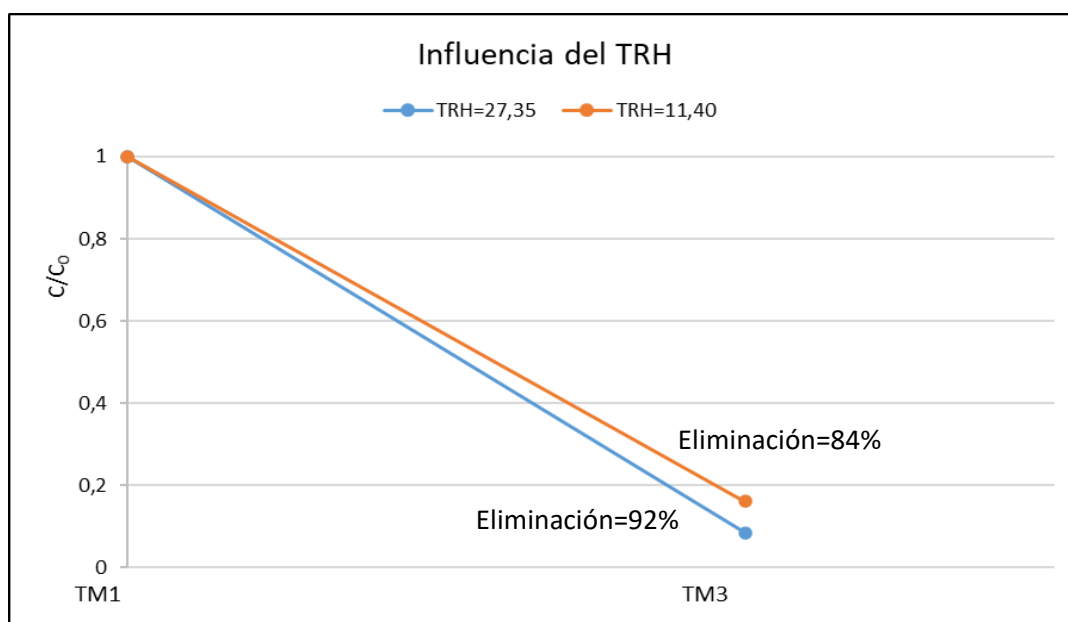


Figura 24. Influencia del TRH en la eliminación de CE's durante el seguimiento diario.

Si evaluamos la eliminación global de los contaminantes emergentes los resultados, en definitiva, muestran que las concentraciones de CE's a la entrada del prototipo son muy bajas. Esto permite que puedan ser adsorbidas por el lecho y se reduzcan a niveles por debajo de los límites de detección del método analítico a su paso por el carbón activo. Se concluye que, en condiciones normales de operación, con las características reales del agua de salida del decantador secundario, el prototipo puede funcionar de forma eficiente a 1200

L/h sin que se vea afectada la calidad del agua regenerada. Para los dos caudales ensayados 500 L/h y 1200 L/h los resultados indican una eliminación de CEs superior al 80%, incrementando la eliminación en un 8 % cuando se incrementa más del doble el tiempo de contacto (11.4 a 27.35)

Una de las pocas normativas respecto a los contaminantes emergentes en las aguas residuales de efluentes de EDAR es la normativa Suiza. Después de la implementación de los procesos de tratamiento, según esta normativa se requiere una eliminación del 80% en relación con las aguas residuales influyentes para un conjunto de sustancias indicadoras, incluidas la carbamazepina y el diclofenaco (Hochstrat, n.d.).

En el presente estudio se consiguen estas recomendaciones con los caudales ensayados.

En la Figura 25, se analiza el comportamiento del diclofenaco a su paso por el lecho de carbón activo, trabajando a un caudal de 1200 L/h. Se ha escogido el diclofenaco ya que es el contaminante que más se detecta en las aguas depuradas provenientes del decantador secundario y por lo tanto con el que mejor se realizará el estudio en condiciones reales.

Se ha representado su concentración a la entrada del prototipo (TM1 - ●) y a la salida del carbón activado (TM3 - ▲).

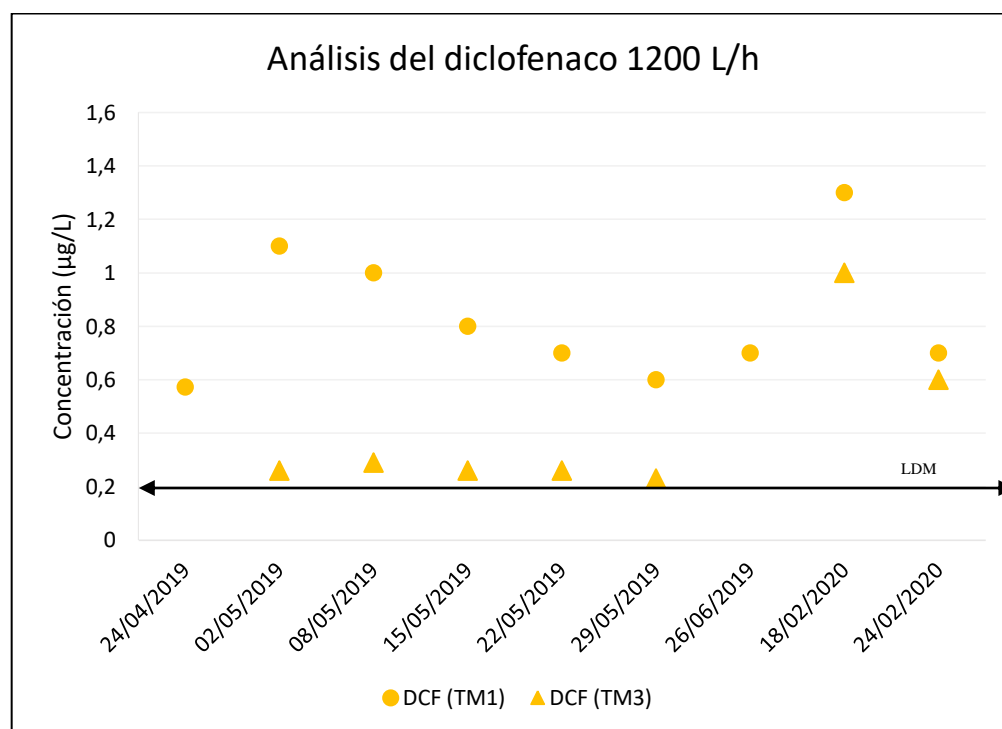


Figura 25. Concentración del diclofenaco a la entrada del prototipo (TM1) y a la salida del CA (TM3).

Como se observa el diclofenaco aparece en todos los ensayos a distintas concentraciones, pero siempre con valores inferiores a 1.3 ppb. Mientras el carbón activado mantiene adecuadamente sus características de adsorción, los niveles de diclofenaco tras su paso por el carbón activo se reducen hasta prácticamente los límites de detección del método. Para el último ensayo a caudal de 1200 L/h el carbón activo parece agotarse, reduciendo su capacidad de eliminación.

Es conveniente indicar que, con el avance de los ensayos, se sospecha que un carbón activado mineral con una proporción superior de mesoporos entre 2 y 50 nm podría haber dado mejores rendimientos de eliminación. Este será uno de los objetivos del estudio en los próximos meses del proyecto.

Por lo tanto, y para concluir con el estudio de la eficiencia del CA, es una técnica útil para la eliminación de contaminantes emergentes, donde será necesario tener en cuenta el compromiso existente entre la calidad de agua requerida y los caudales aportados, así como las condiciones operacionales seleccionadas, como el tiempo de contacto y el tipo de CA que muestre los mejores rendimientos de eliminación de CE.

7.3. ETAPA DE DESINFECCIÓN.

En la Tabla 11 se cuantifican los indicadores microbiológicos a la entrada del prototipo (TM1) y tras su paso por el reactor UV (TM4) para los dos tiempos de retención sobre el carbón activo estudiados (11.4 y 27.35)

Tabla 11. Indicadores biológicos a la entrada del prototipo (TM1) y a la salida del reactor UV (TM4).

		TM1				TM4			
		Esporas C.P.	E.Coli	Colíf. Totales	Colíf. Fec. Somáticos	Esporas C.P.	E.Coli	Colíf. Totales	Colíf. Fec. Somáticos
		UFC/100 ml	UFC/100 ml	u.f.p./100 ml	u.f.p./100 ml	UFC/100 ml	UFC/100 ml	u.f.p./100 ml	u.f.p./100 ml
TRH (min)	11.40	1800	1800	< 1	< 1	0	4	< 1	< 1
		1800	1800	< 1	< 1	2	2	< 1	< 1
		1800	1800	< 1	< 1	1	25	< 1	< 1
		3800	2500	20	19	0	0	< 1	< 1
		1300	4700	51	50	0	0	< 1	< 1
		1300	4700	51	50	0	2	< 1	< 1
		4000	9800	150	150	0	0	< 1	< 1
		3400	32000	220	210	1400	0	< 1	< 1
		4300	8500	31	31	460	2	< 1	< 1

27.35	5400	1000	3	3	0	0	< 1	< 1
	5400	1000	3	3	0	3	< 1	< 1
	5400	1000	3	3	0	1	< 1	< 1
	2200	8400	34	33	0	1	< 1	< 1
	2200	8400	34	33	0	1	< 1	< 1
	3700	8800	3	3	6	9	< 1	< 1
	3500	7700	2	2	11	14	< 1	< 1
	2500	7000	35	35	0	2	< 1	< 1

En todos los casos se cumple con los requerimientos en cuanto a concentraciones de Escherichia Coli en el agua para uso agrícola incluidos en el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas en España.

Además, se cumple con lo establecido en el reciente reglamento de la Unión Europea cumpliendo los límites fijados de Escherichia Coli, Esporas de Clostridium Perfringens, colifagos totales y colifagos somáticos, en los controles de validación para las nuevas estaciones de regeneración.

La Figura 26 representa la tasa de desinfección para los dos tiempos de contacto objeto de estudio.

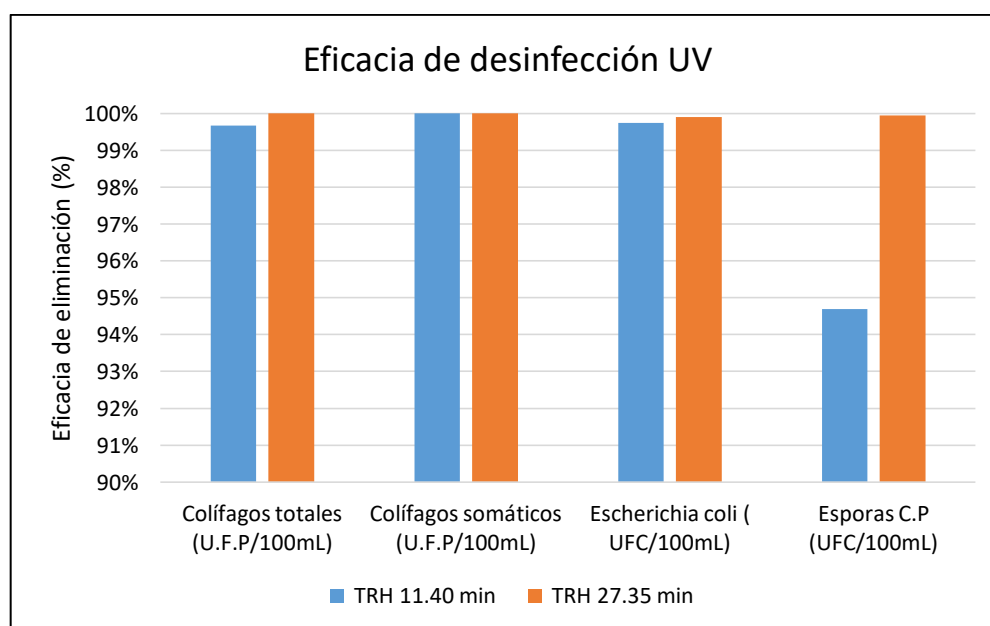


Figura 26. Influencia del tiempo de exposición en la eficacia de eliminación.

Los análisis muestran una elevada eficiencia de eliminación para ambos tiempos ensayados, superando el 90% de remoción y alcanzando en su mayoría el 100% de eliminación excepto para las esporas, para las que se obtuvo una eliminación menor al 95 % para el TRH de 11.40 min

Por tanto, es muy importante hacer estudios piloto para optimizar las condiciones de operación que garanticen los resultados ajustados a la legislación vigente y más aún, para la eliminación de sustancias o microorganismos en aguas que requieran una excelente calidad para ser utilizadas en determinados cultivos sensibles o bien para otras aplicaciones.

De modo que se demuestra que la etapa de desinfección UV permite obtener efluentes de calidad microbiológica apta para su aplicación agrícola.

8. CONCLUSIONES.

El prototipo estudiado en este trabajo garantiza una gestión sostenible de un recurso tanpreciado y escaso como es el agua, y asegura un aumento en la cantidad de agua disponible, cumpliendo con los objetivos de desarrollo sostenible en materia de aguas y garantiza la producción de un efluente de contrastada calidad para su reutilización en agricultura.

Es importante destacar que la calidad de las aguas residuales para su reutilización en la agricultura es de gran importancia para garantizar la seguridad de los consumidores finales.

Se citan, a continuación, las conclusiones principales del trabajo:

- Los filtros de discos actúan como una etapa de seguridad eficiente hidráulica y energéticamente.
- Para los ensayos de fortificación se ha conseguido una eliminación de contaminantes emergentes incluso superiores al 80% para los caudales estudiados, utilizando el CA CG900.
- La reducida presencia de CE's en las condiciones de operación reales de la planta, con el agua de salida del decantador secundario de la EDAR, permiten que el prototipo pueda operar a un caudal de 1200 L/h sin que se vea afectada la calidad del agua regenerada en términos de contaminación microbiológica y contaminantes emergentes estudiados. Para ambos caudales de 500 L/h y 1200 L/h el prototipo consigue una eliminación superior al 80% de CE's.
- El pH del agua residual y la naturaleza contaminantes que se quieren eliminan tienen una importante influencia en la eliminación. Las interacciones electroestáticas entre los fármacos cargados positivamente y la carga superficial negativa del carbón activado aumentan la adsorción como se propuso para las moléculas de carbamazepina y acetaminofén, sin embargo, la eritromicina pese a que las fuerzas electroestáticas podrían contribuir a su adsorción, su eliminación fue menor lo que se atribuyó a su mayor tamaño molecular que impide que las moléculas de eritromicina accedan a los microporos del CA .
- Se demuestra que el carbón activado es un método eficiente para la eliminación de contaminantes emergentes en los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

- Asimismo, la tecnología de radiación UV demuestra ser un método eficaz para la desinfección de efluentes regenerados obteniendo tasas de desinfección cercanas al 100% en la mayoría de los ensayos: Las tasas de eliminación superan el 95% para todos los indicadores biológicos, E.coli, Colifagos totales/colifagos F-específicos, colifagos somáticos y Esporas de Clostridium perdingens.
- El tratamiento propuesto ha demostrado ser plenamente eficiente en la desinfección microbiológica presente en las aguas residuales depuradas.
- Los resultados determinan que la etapa que limitará el flujo de caudal en el tratamiento será la adsorción sobre carbón activo, y dependerá de los niveles de contaminantes emergentes a la entrada del prototipo.

La tecnología propuesta para el prototipo REUSAGUA representa una opción factible para el tratamiento y la regeneración de aguas residuales urbanas, y su posterior reutilización segura en agricultura.

BIBLIOGRAFÍA

- 2004), P. A.-, de, N. criterios para el diseño y operación, & 2004, undefined. (n.d.). *Mecanismos de eliminación de la materia orgánica y de los nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial*.
- Acosta Castellanos, P. M., Caro Camargo, C. A., & Perico Granados, N. R. (2016). Análisis de interferencia de parámetros físicos del agua, en desinfección por radiación UV. *Revista de Tecnología*, 14(2). <https://doi.org/10.18270/rt.v14i2.1874>
- Aguirre, P. A., García, J., & Mujeriego Sahuquillo, R. (2004). Desinfección con cloro y luz UV en un proceso convencional de regeneración de agua. *Ingeniería Del Agua*, 11(1), 75. <https://doi.org/10.4995/ia.2004.2524>
- Ahmad, A. A., & Hameed, B. H. (2010). Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175, 298–303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.003>
- Ajmal, Z., Usman, M., Anastopoulos, I., Qadeer, A., Zhu, R., Wakeel, A., & Dong, R. (2020). Use of nano-/micro-magnetite for abatement of cadmium and lead contamination. *Journal of Environmental Management*, 264(March), 110477. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110477>
- Al Mardini, F., & Legube, B. (2010). Effect of the adsorbate (Bromacil) equilibrium concentration in water on its adsorption on powdered activated carbon. Part 3: Competition with natural organic matter. *Journal of Hazardous Materials*, 182(1–3), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.035>
- Alvarez-Pugliese, C. E., Acuña-Bedoya, J., Vivas-Galarza, S., Prado-Arce, L. A., & Marriaga-Cabral, N. (2019). Electrolytic regeneration of granular activated carbon saturated with diclofenac using BDD anodes. *Diamond and Related Materials*, 93, 193–199. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.02.018>
- Calero1, M., Lara, M. A. M., Ronda, A., Tenorio, G., & Blázquez, G. (2007). *Tratamiento de efluentes acuáticos con contaminantes emergentes: Eliminación de bisfenol A mediante adsorción con carbón activo*. 4.
- Calza, P., Sakkas, V. A., Medana, C., Baiocchi, C., Dimou, A., Pelizzetti, E., & Albanis, T. (2006). Photocatalytic degradation study of diclofenac over aqueous TiO₂ suspensions. *Applied Catalysis B: Environmental*, 67(3–4),

- 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.04.021>
- Cazetta, A. L., Junior, O. P., Vargas, A. M. M., Da Silva, A. P., Zou, X., Asefa, T., & Almeida, V. C. (2013). Thermal regeneration study of high surface area activated carbon obtained from coconut shell: Characterization and application of response surface methodology. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.013>
- Christou, A., Agüera, A., Bayona, J. M., Cytryn, E., Fotopoulos, V., Lambropoulou, D., Manaia, C. M., Michael, C., Revitt, M., Schröder, P., & Fatta-Kassinos, D. (2017). The potential implications of reclaimed wastewater reuse for irrigation on the agricultural environment: The knowns and unknowns of the fate of antibiotics and antibiotic resistant bacteria and resistance genes – A review. In *Water Research* (Vol. 123, pp. 448–467). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.004>
- Comisión Europea. (2018). Propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua. *Diario Oficial de La Unión Europea*, 2019, 2–32. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:e8951067-627c-11e8-ab9c-01aa75ed71a1.0024.02/DOC_2&format=PDF
- Da'Na, E., & Awad, A. (2017). Regeneration of spent activated carbon obtained from home filtration system and applying it for heavy metals adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(4), 3091–3099. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.06.022>
- de Franco, M. A. E., de Carvalho, C. B., Bonetto, M. M., Soares, R. de P., & Féris, L. A. (2017). Removal of amoxicillin from water by adsorption onto activated carbon in batch process and fixed bed column: Kinetics, isotherms, experimental design and breakthrough curves modelling. *Journal of Cleaner Production*, 161, 947–956. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.197>
- Delgado, N., Capparelli, A., Navarro, A., & Marino, D. (2019). Pharmaceutical emerging pollutants removal from water using powdered activated carbon: Study of kinetics and adsorption equilibrium. *Journal of Environmental Management*, 236, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.116>
- Deng, S., Yan, X., Zhu, Q., & Liao, C. (2019). The utilization of reclaimed water: Possible risks arising from waterborne contaminants. In *Environmental Pollution* (Vol. 254). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113020>

- Deviller, G., Lundy, L., & Fatta-Kassinos, D. (2020). Recommendations to derive quality standards for chemical pollutants in reclaimed water intended for reuse in agricultural irrigation. *Chemosphere*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124911>
- Drechsel, P., Scott, C. A., Raschid-Sally, L., Redwood, M., & Bahri, A. (2010). Wastewater Irrigation and Health Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries Wastewater Irrigation and Health Earthscan strives to minimize its impact on the environment Water / Agriculture and Food / Development. In *Pay Drechsel is Global Theme Leader on Water Quality*. International Water Management Institute (IWMI); Earthscan; International Development Research Centre (IDRC). www.earthscan.co.uk
- Dunlop, S. G., & Wang, W.-L. Lou. (1961). STUDIES ON THE USE OF SEWAGE EFFLUENT FOR IRRIGATION OF TRUCK CROPS^{1,2}. *Journal of Milk and Food Technology*, 24(2), 44–47. <https://doi.org/10.4315/0022-2747-24.2.44>
- Durán-Jiménez, G., Stevens, L. A., Hodgins, G. R., Uguna, J., Ryan, J., Binner, E. R., & Robinson, J. P. (2019). Fast regeneration of activated carbons saturated with textile dyes: Textural, thermal and dielectric characterization. *Chemical Engineering Journal*, 378, 121774. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.135>
- Epa, U. (n.d.). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales - Desinfección con luz ultravioleta EPA 832-F-99-064*.
- Esplugas, S., Bila, D. M., Krause, L. G. T., & Dezotti, M. (2007). Ozonation and advanced oxidation technologies to remove endocrine disrupting chemicals (EDCs) and pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water effluents. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 149, Issue 3, pp. 631–642). J Hazard Mater. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.073>
- European Environment Agency. (2018). *Industrial waste water treatment pressures on environment* (Issue 23). [https://www.eea.europa.eu/publications/industrial-waste-water-treatment-pressures%0Ahttp://files/558/Rapport EEA Industrial waste water treatment – pressures on Europe’s environment.pdf](https://www.eea.europa.eu/publications/industrial-waste-water-treatment-pressures%0Ahttp://files/558/Rapport%20EEA%20Industrial%20waste%20water%20treatment%20%E2%80%93%20pressures%20on%20Europe%E2%80%99s%20environment.pdf)
- Fuhrmann, S., Winkler, M. S., Stalder, M., Niwagaba, C. B., Babu, M., Kabatereine, N. B., Halage, A. A., Utzinger, J., Cissé, G., & Nauta, M. (2016). Disease burden due to gastrointestinal pathogens in a wastewater system in Kampala, Uganda. *Microbial Risk Analysis*, 4, 16–28.

<https://doi.org/10.1016/j.mran.2016.11.003>

- García-Mateos, F. J., Ruiz-Rosas, R., Marqués, M. D., Cotoruelo, L. M., Rodríguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2015). Removal of paracetamol on biomass-derived activated carbon: Modeling the fixed bed breakthrough curves using batch adsorption experiments. *Chemical Engineering Journal*, 279, 18–30. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.04.144>
- Hepplewhite, C., Newcombe, G., & Knappe, D. R. U. (2004). NOM and MIB, who wins in the competition for activated carbon adsorption sites? *Water Science and Technology*, 49(9), 257–265. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0584>
- Hochstrat, R. (n.d.). *Elimination of micropollutants-the Swiss approach Outline Background*. <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/images/ortho/swissimage.html>
- Joseph, L., Heo, J., Park, Y. G., Flora, J. R. V., & Yoon, Y. (2011). Adsorption of bisphenol A and 17 α -ethinyl estradiol on single walled carbon nanotubes from seawater and brackish water. *Desalination*, 281(1), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.07.044>
- Kadirvelu, K., & Namasivayam, C. (2003). Activated carbon from coconut coirpith as metal adsorbent: Adsorption of Cd(II) from aqueous solution. *Advances in Environmental Research*, 7(2), 471–478. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00018-7)
- Katsigiannis, A., Noutsopoulos, C., Mantziaras, J., & Gioldasi, M. (2015). Removal of emerging pollutants through Granular Activated Carbon. *Chemical Engineering Journal*, 280, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.109>
- Kreft, P., & Venosa, O. K. S. y A. (1986). Estudios hidráulicos y evaluaciones de limpieza de unidades de desinfección ultravioleta. In *Revista (Federación de Control de la Contaminación del Agua)* (Vol. 58). Wiley. <https://doi.org/10.2307/25043146>
- Krzeminski, P., Tomei, M. C., Karaolia, P., Langenhoff, A., Almeida, C. M. R., Felis, E., Gritten, F., Andersen, H. R., Fernandes, T., Manaia, C. M., Rizzo, L., & Fatta-Kassinos, D. (2019). Performance of secondary wastewater treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern implicated in crop uptake and antibiotic resistance spread: A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 648, pp. 1052–1081). Elsevier B.V.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.130>

- Li, H. Y., Osman, H., Kang, C. W., & Ba, T. (2017). Numerical and experimental investigation of UV disinfection for water treatment. *Applied Thermal Engineering*, 111, 280–291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.106>
- Li, Y., Zhang, S., Zhang, W., Xiong, W., Ye, Q., Hou, X., Wang, C., & Wang, P. (2019). Life cycle assessment of advanced wastewater treatment processes: Involving 126 pharmaceuticals and personal care products in life cycle inventory. *Journal of Environmental Management*, 238, 442–450. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.01.118>
- McQuillan, R. V., Stevens, G. W., & Mumford, K. A. (2018). The electrochemical regeneration of granular activated carbons: A review. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 355, pp. 34–49). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.079>
- Murphy, E. A., Post, G. B., Buckley, B. T., Lippincott, R. L., & Robson, M. G. (2012). Future Challenges to Protecting Public Health from Drinking-Water Contaminants. *Annual Review of Public Health*, 33(1), 209–224. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-031811-124506>
- Norman, N. N., & Kabler, P. W. (n.d.). Bacteriological Study of Irrigated Vegetables. In *Sewage and Industrial Wastes* (Vol. 25, pp. 605–609). <https://doi.org/10.2307/25032180>
- Ocampo-Pérez, A. I. M.-R. D. H. C.-A. R. L.-R. R. (2015). carbón activado granular en solución acuosa Adsorption equilibrium and kinetics of pharmaceutical compounds onto granular activated carbon from aqueous phase. *Boletim Grupo Espanol Carbon*, 36, 6–10.
- Oller, I., Malato, S., & Sánchez-Pérez, J. A. (2011). Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination-A review. In *Science of the Total Environment* (Vol. 409, Issue 20, pp. 4141–4166). Sci Total Environ. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.061>
- Önal, S., Baysal, Ş. H., & Ozdemir, G. (2007). Studies on the applicability of alginate-entrapped *Chryseomonas luteola* TEM 05 for heavy metal biosorption. *Journal of Hazardous Materials*, 146(1–2), 417–420. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.005>
- Piña, B., Bayona, J. M., Christou, A., Fatta-Kassinos, D., Guillon, E., Lambropoulou, D., Michael, C., Polesel, F., & Sayen, S. (2020). On the

contribution of reclaimed wastewater irrigation to the potential exposure of humans to antibiotics, antibiotic resistant bacteria and antibiotic resistance genes - NEREUS COST Action ES1403 position paper. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(1).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.01.011>

- Prados Joya, G. (2014). *Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Antibióticos - Nitroimidazoles- mediante Adsorción sobre Carbón Activado y Tratamiento de Aguas para la Eliminación de Antibióticos - Nitroimidazoles- mediante Adsorción sobre Carbón Activado y Tecnologías Avanza* (Issue May).
- Radjenovic, J., Petrovic, M., & Barceló, D. (2007). Analysis of pharmaceuticals in wastewater and removal using a membrane bioreactor. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387(4), 1365–1377.
<https://doi.org/10.1007/s00216-006-0883-6>
- Rahman, S. M., Eckelman, M. J., Onnis-Hayden, A., & Gu, A. Z. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of Advanced Wastewater Treatment Processes for Removal of Chemicals of Emerging Concern. *Environmental Science and Technology*, 52(19), 11346–11358.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00036>
- Ratola, N., Cincinelli, A., Alves, A., & Katsoyiannis, A. (2012). Occurrence of organic microcontaminants in the wastewater treatment process. A mini review. *Journal of Hazardous Materials*, 239–240, 1–18.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.05.040>
- Richardson, S. D. (2003). Disinfection by-products and other emerging contaminants in drinking water. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, 22(10), 666–684. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)01003-3](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)01003-3)
- Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., McArdell, C. S., Perez, J. A. S., Schaar, H., & Fatta-Kassinos, D. (2020). Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. In *Science of the Total Environment* (Vol. 710). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>
- Rizzo, L., Krätke, R., Linders, J., Scott, M., Vighi, M., & de Voogt, P. (2018). Proposed EU minimum quality requirements for water reuse in agricultural irrigation and aquifer recharge: SCHEER scientific advice. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 2, pp. 7–11). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.004>

- Robers, A., Figura, M., Thiesen, P. H., & Niemeyer, B. (2005). Desorption of odor-active compounds by microwaves, ultrasound, and water. *AIChE Journal*, 51(2), 502–510. <https://doi.org/10.1002/aic.10334>
- Rodríguez, G., & Rato, M. (2017). *Microcontaminantes Emergentes* . 547–552.
- Saravia, F., & Frimmel, F. H. (2008). Role of NOM in the performance of adsorption-membrane hybrid systems applied for the removal of pharmaceuticals. *Desalination*, 224(1–3), 168–171. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.089>
- Tan, I. A. W., Hameed, B. H., & Ahmad, A. L. (2007). Equilibrium and kinetic studies on basic dye adsorption by oil palm fibre activated carbon. *Chemical Engineering Journal*, 127(1–3), 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.09.010>
- Thomaidis, N. S., & Asimakopoulos, A. G. (2012). EMERGING CONTAMINANTS: A TUTORIAL MINI-REVIEW. In *Global NEST Journal* (Vol. 14, Issue 1).
- Tsai, W. T., Chang, C. Y., & Lee, S. L. (2000). *Preparation and characterization of activated carbons from corn cob*. 1198–1200.
- Vidal, M. V, Suarez, A. R., Barrios, K. M., & Pérez, J. O. (2018). Potencial de residuos agroindustriales para la síntesis de Carbón Activado: una revisión. *Scientia et Technica*, 23(3), 411–419. <https://doi.org/10.22517/23447214.17031>
- Vogna, D., Marotta, R., Andreozzi, R., Napolitano, A., & D’Ischia, M. (2004). Kinetic and chemical assessment of the UV/H₂O₂ treatment of antiepileptic drug carbamazepine. *Chemosphere*, 54(4), 497–505. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00757-4](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00757-4)
- Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K. H., Kwon, E. E., & Tsang, Y. F. (2017). Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. In *Science of the Total Environment* (Vols. 596–597, pp. 303–320). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.102>
- Yu, Z., Peldszus, S., & Huck, P. M. (2008). Adsorption characteristics of selected pharmaceuticals and an endocrine disrupting compound- Naproxen, carbamazepine and nonylphenol-on activated carbon. *Water Research*, 42(12), 2873–2882. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.02.020>

Zoschke, K., Engel, C., Börnick, H., & Worch, E. (2011). Adsorption of geosmin and 2-methylisoborneol onto powdered activated carbon at non-equilibrium conditions: Influence of NOM and process modelling. *Water Research*, 45(15), 4544–4550.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.006>